

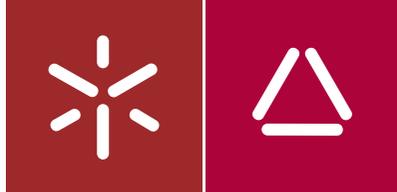


Universidade do Minho  
Instituto de Ciências Sociais

Carlos Alberto Ribeiro Eiras de Campos

Simulador de chuva portátil para análise da erosão dos solos: aplicação a áreas áridas





Universidade do Minho  
Instituto de Ciências Sociais

Carlos Alberto Ribeiro Eiras de Campos

Simulador de chuva portátil para análise da  
erosão dos solos: aplicação a áreas ardidas

Dissertação de Mestrado  
Mestrado em Geografia, área de especialização em Planeamento  
e Gestão do Território

Trabalho efetuado sob a orientação do  
Professor Doutor António Avelino Batista Vieira

## **DIREITOS DE AUTOR E CONDIÇÕES DE UTILIZAÇÃO DO TRABALHO POR TERCEIROS**

Este é um trabalho académico que pode ser utilizado por terceiros desde que respeitadas as regras e boas práticas internacionalmente aceites, no que concerne aos direitos de autor e direitos conexos.

Assim, o presente trabalho pode ser utilizado nos termos previstos na licença abaixo indicada.

Caso o utilizador necessite de permissão para poder fazer um uso do trabalho em condições não previstas no licenciamento indicado, deverá contactar o autor, através do RepositóriUM da Universidade do Minho.



**Atribuição-NãoComercial-SemDerivações**

**CC BY-NC-ND**

<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>

## **Agradecimentos**

Ao meu orientador, Professor Doutor António Avelino Batista Vieira, expresso a minha gratidão pela forma entusiasta com que aceitou orientar-me neste trabalho, pelo estímulo e disponibilidade com que me acompanhou ao longo desta aventura, pela partilhada de conhecimentos e pela amizade.

Joana, Beatriz e Angelina, obrigado por me apoiaram neste projeto, acreditando em mim e nas minhas capacidades.

Aos meus pais (em especial às minhas mães) sempre presentes nas saudades e nos valores que me transmitiram.

Agradeço ao Departamento de Geografia pelas condições proporcionadas, ao seu corpo Docente e funcionários, que me instruíram e ajudaram nas diversas áreas da geografia e demais dificuldades.

Agradeço ao Professor Doutor António José Bento Gonçalves, pelo incentivo, pelas conversas e pela amizade.

Ao Abdulsalam Muhrat pelos conhecimentos partilhados, pelas dicas, ajudas e empréstimo de diverso equipamento.

Ao Afonso Sousa fico-lhe grato pela enorme ajuda na programação e testes - fiquei deveras impressionado com o empenho com que se dedicou a resolver diversas questões que pareciam impossíveis.

Ao José Rocha pelos artigos que me cedeu, pelos conhecimentos partilhados pelo incentivo e constante boa disposição.

Ao longo deste processo, foram várias as pessoas que me ajudaram a superar os desafios e que me deram força para chegar ao fim.

Muito obrigado a todos.

## **DECLARAÇÃO DE INTEGRIDADE**

Declaro ter atuado com integridade na elaboração do presente trabalho académico e confirmo que não recorri à prática de plágio nem a qualquer forma de utilização indevida ou falsificação de informações ou resultados em nenhuma das etapas conducente à sua elaboração.

Mais declaro que conheço e que respeitei o Código de Conduta Ética da Universidade do Minho.

## **Resumo**

### **Simulador de chuva portátil para análise da erosão dos solos: aplicação a áreas ardidadas**

A ocorrência de incêndios florestais é uma das principais causas da devastação da floresta portuguesa e conseqüentemente da deterioração dos solos onde ocorrem. Nas últimas décadas tem-se assistido a um aumento significativo de casos, originando, anualmente, a destruição de milhares de hectares de superfície florestal.

Os incêndios deixam os solos desprovidos da sua cobertura natural que assim ficam expostos à agressividade das chuvas (erosão hídrica) e demais agentes erosivos, sofrendo por vezes danos irreversíveis.

O presente trabalho pretende contribuir com uma ferramenta, capaz de simular chuvas e assim possibilitar as condições para a realização de testes, que ajudem a perceber melhor as dinâmicas da erosão hídrica em áreas ardidadas.

A primeira parte da tese resulta de uma extensa pesquisa bibliográfica que nos permitiu enquadrar o tema de estudo, e onde tentamos perceber as causas para o elevado número de incêndios florestais ocorridos anualmente em Portugal.

A segunda parte, igualmente teórica, é dedicada aos simuladores de chuva: a necessidade de chuva artificial, antecedentes e evolução dos diversos modelos, as suas características e valências.

A terceira parte descreve a construção de um simulador de chuva portátil, os vários componentes que o constituem, a programação específica que implementamos e a realização de testes.

**Palavras-chave:** Incêndios florestais, erosão hídrica, simulador de chuva.

## **Abstract**

### **Portable rain simulator for soil erosion analysis: application to burned areas**

The occurrence of forest fires is one of the main causes of the devastation of the Portuguese forest and, consequently, of the deterioration of the soils where they occur. In recent decades has been a significant increase in cases, causing the destruction of thousands of hectares of forest area annually.

Fires leave the soil deprived of its natural cover, exposed to the aggressiveness of rain (water erosion) and other erosive agents, sometimes suffering irreversible damage.

The present work is dedicated to study dynamics of water erosion in burned areas through developing a simulator of rainfall. The simulator is capable of enabling the realistic conditions for carrying out similar field tests.

The first part of the thesis achieved by an extensive bibliographical research that allowed to frame the study theme, and helped to understand the causes for the high number of forest fires that occur annually in Portugal.

The second part, is dedicated to rain simulators: the need for artificial rain, antecedents, evolution of the different models, and their characteristics and valences.

The third part included the practical side of this work which include the construction of a portable rain simulator, the various components that make it up, the implemented specific programming, and testing.

**Keywords:** Forest fires, water erosion, rain simulator.

# Índice Geral

<b>AGRADECIMENTOS</b>	<b>II</b>
<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>1</b>
<b>OBJETIVOS</b>	<b>2</b>
<b>METODOLOGIA</b>	<b>2</b>
<b>1 – OS INCÊNDIOS FLORESTAIS E OS SEUS IMPACTES NA EROSÃO DOS SOLOS.</b>	<b>3</b>
1.1 - INCÊNDIOS FLORESTAIS	3
1.2 - NOÇÃO DE INCÊNDIO FLORESTAL	6
1.3 - TIPOS DE INCÊNDIOS FLORESTAIS	8
1.4 - CAUSAS DOS INCÊNDIOS FLORESTAIS	10
1.5 - CONSEQUÊNCIAS DOS INCÊNDIOS FLORESTAIS	12
1.6 - EROSÃO DOS SOLOS EM ÁREAS ARDIDAS	15
<b>2 – SIMULAÇÃO DE CHUVAS: METODOLOGIAS UTILIZADAS E APLICAÇÕES EM EROSÃO DOS SOLOS E PARTICULARMENTE NA EROSÃO DOS SOLOS EM ÁREAS ARDIDAS.</b>	<b>19</b>
2.1 - A NECESSIDADE DA CHUVA ARTIFICIAL NOS ESTUDOS DE EROSÃO HÍDRICA	19
2.2 - PRINCIPAIS CARACTERÍSTICAS DOS SIMULADORES DE CHUVA	22
2.3 - ANTECEDENTES E EVOLUÇÃO	24
<b>3 – PROJETO – CONSTRUÇÃO DE UM SIMULADOR DE CHUVA</b>	<b>27</b>
3.1 - UNIDADE DE CONTROLE	29
3.1.1 - Mas afinal o que é um Arduino?	31
3.1.2 - O Hardware do Arduino	32
3.1.3 - Software	33
3.1.3.1 - Rotina inicial / sequência de arranque - Ações automáticas:	34
3.1.3.2 – Programa	35
3.2 - UNIDADE DE PREPARAÇÃO DA ÁGUA	37
3.3 - ESTRUTURA DE SUPORTE E PRODUÇÃO DA CHUVA SIMULADA	39
3.4 - TESTES	41
<b>CONCLUSÃO</b>	<b>45</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b>	<b>47</b>
<b>APÊNDICES</b>	<b>56</b>

## Índice de Figuras

Figura 1. Pampilhosa da Serra: paisagem pós-incêndios de 2017 .....	3
Figura 2. Evolução anual do número de ocorrências de incêndios florestais, entre 1981 e 2019, em Portugal Continental .....	4
Figura 3. Fogo: combustão controlada .....	6
Figura 4. Incêndio florestal - Combustão sem controlo no espaço e no tempo .....	7
Figura 5. Triângulo do Fogo.....	7
Figura 6. Tetraedro do Fogo.....	8
Figura 7. Tipos de propagação de incêndios florestais através dos combustíveis .....	9
Figura 8. Esquema das fases do processo de erosão.....	13
Figura 9. Inter-relação entre os fatores que condicionam a erosão.....	17
Figura 10. Tipos de simuladores de chuva .....	22
Figura 11. Dust Bowl: tempestade de pó próxima de Stratford, Texas, abril 1935 .....	25
Figura 12. Projeto .....	28
Figura 13. Unidade de controle .....	29
Figura 14. Interior da unidade de controle.....	29
Figura 15. Esquema das ligações.....	30
Figura 16. Placa Arduino Uno.....	31
Figura 17. Sequência do programa .....	36
Figura 18. Esquema de montagem da unidade de preparação da água.....	37
Figura 19. Diversos componentes que usamos no projeto.....	38
Figura 20. Unidade de preparação da água.....	38
Figura 21. Estrutura de suporte .....	39

## Índice de Tabelas

Tabela 1. Ensaios a 1 bar de pressão com a duração de 1000 milissegundos.....	41
Tabela 2. Quantidade de água pulverizada durante 10 segundos a diferentes pressões .....	42

## **Introdução**

Portugal tem sido devastado nas últimas décadas por numerosos incêndios, com alguns anos considerados trágicos (2003, 2005 ou 2017), resultando em extensas perdas de vidas humanas e bens materiais.

Os solos (componente fundamental ao suporte de vida vegetal) são um dos elementos particularmente vulneráveis à ação dos incêndios, sendo muitas vezes negligenciados, e sofrendo alterações significativas quando afetados pelo fogo. Em função da severidade do fogo, as propriedades do solo (químicas e físicas) podem registar acentuadas alterações (Bento-Gonçalves *et al.*, 2012; Mataix-Solera *et al.*, 2011; Neary *et al.*, 1999; Neary and Leonard, 2015; Shakesby, 2011).

Uma das consequências apuradas é a intensificação da erosão hídrica nas áreas áridas, nas quais se verifica uma remoção ativa de material superficial, conduzindo ao empobrecimento do solo e, em situações extremas, podendo levar à desertificação (Vieira e Bento-Gonçalves, 2021).

A degradação do solo devido à erosão hídrica é uma preocupação primordial porque causa um dano irreversível à produtividade, sendo conhecida por ser uma das causas do desequilíbrio ecológico.

Como a intensidade do fogo e a precipitação são dois fatores que, quando combinados, potenciam a erosão, é indispensável realizar mais estudos, de modo a obter conhecimento muito profundo quanto a esta dinâmica.

Uma das grandes dificuldades quando se pretende estudar o risco de erosão hídrica do solo, está relacionada com a complexidade em se prever quando e onde vai chover, além de não ser possível saber se o evento terá a intensidade e a duração necessárias para produzir erosão.

Assim, percebeu-se a necessidade de criar uma ferramenta de trabalho que permitisse a realização desses estudos – os simuladores de chuva.

Os simuladores de chuva devem ser projetados de modo a permitir a aplicação de água no solo de uma forma semelhante à da chuva natural, possibilitando o controlo da quantidade de precipitação, a sua intensidade e duração.

Devido à limitada oferta comercial, os investigadores costumam construir os seus próprios simuladores de chuva, tendo por base os parâmetros que pretendem analisar.

## **Objetivos**

O objetivo principal proposto para este trabalho de investigação foi o da construção de um simulador de chuva que permitisse a avaliação dos processos erosivos em áreas afetadas por incêndios florestais por ação de precipitação, mas que apresentasse reduzidas dimensões e peso, de forma a permitir o seu fácil transporte, tendo em vista a sua utilização em zonas florestais por vezes de difícil acesso.

Este equipamento destina-se a apoiar a realização de testes de erosão dos solos em áreas sujeitas a incêndios florestais.

## **Metodologia**

O trabalho prévio consistiu em compilar o máximo de informação relacionada com simuladores de chuva. Pesquisamos bibliografia de diferentes autores (nacionais e estrangeiros) que nos elucidaram dos diversos modelos, das suas características, e valências.

A seguir foi a fase da descoberta da oferta comercial disponível, onde nos apercebemos que há poucos modelos portáteis à venda, com custos de aquisição geralmente elevados (a maioria dos simuladores disponíveis são equipamentos de laboratório, de grandes dimensões e muito complexos).

Na posse desses conhecimentos, avançamos para a fase da construção do simulador de chuva portátil, que incluiu o desenho e construção da parte mecânica, seguido pela conceção do elemento de controle.

Esta última fase revestiu-se de particular complexidade pois houve a necessidade de aprendizagem de linguagem de programação em ambiente C++ (programação da placa Arduino).

Com o simulador construído procedeu-se a diversos testes e cálculos de caudais, para afinar e validar o equipamento.

Ao longo do projeto tivemos a oportunidade de utilizar diversos programas informáticos:

AutoCad (utilizado na elaboração dos desenhos)

Matlab (utilizado na programação, cálculos e simulação)

Fritzing (utilizado na elaboração dos circuitos eletrónicos)

## 1 – Os Incêndios florestais e os seus impactes na erosão dos solos.

### 1.1 - Incêndios Florestais

A alteração visual da paisagem é, talvez, o resultado mais visível de um fogo florestal.

Onde o verde pontificava passam a dominar os tons castanho e negro (Figura 1).



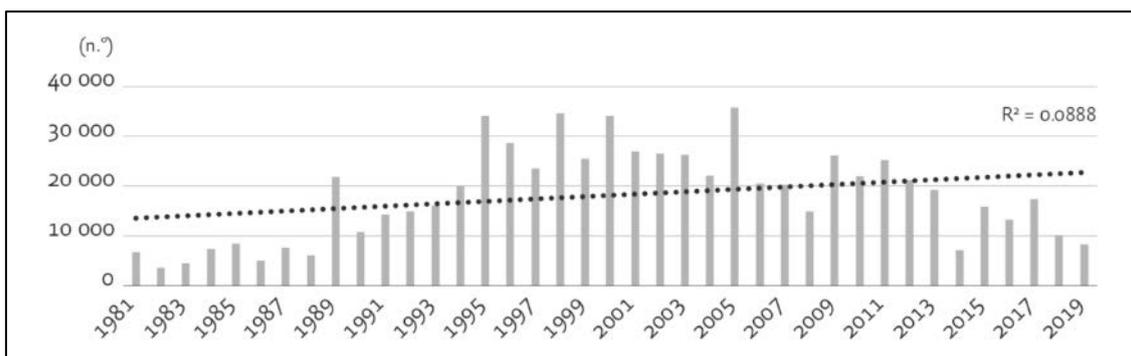
(Fonte: <https://www.jornaldenegocios.pt/>)

Figura 1. Pampilhosa da Serra: paisagem pós-incêndios de 2017

Esta modificação da paisagem assume um significado especial em Portugal, país onde a área arborizada corresponde a cerca de 38% do território nacional, valor que o coloca em sexto lugar no contexto dos países da União Europeia.

*Sendo os fogos florestais um fenómeno que ganhou grande acuidade nos últimos anos, o seu conhecimento resulta, muitas vezes, de relatos vários, feitos quase sempre debaixo de grande carga emocional, por parte de quem acompanha o desenrolar do fenómeno, a qual frequentemente, concorre para a distorção da realidade (Lourenço & Malta, 1993, pág. 261).*

Em Portugal os incêndios florestais constituem um problema muito sério (na observação da Figura 2, podemos constatar a evolução anual do número de ocorrências para o período entre 1981 e 2019); com importantes consequências ecológicas, sociais e económicas, apesar de o fogo ser característico das zonas mediterrâneas (por terem uma estação quente e seca bem definida, precedida de uma estação das chuvas).



(Fonte: Bento-Gonçalves, 2021)

Figura 2. Evolução anual do número de ocorrências de incêndios florestais, entre 1981 e 2019, em Portugal Continental

Deste modo pelas suas condições climáticas e de vegetação, reconhece-se claramente que os incêndios florestais no nosso país têm assumido proporções muito preocupantes.

Portugal Continental encontra-se numa posição geográfica de alto risco, pelo que a proteção da floresta contra os incêndios deve assumir um papel determinante - a floresta ocupa uma área de 3,3 milhões de hectares (dos quais 44% se caracterizam por serem espécies resinosas e 56% folhosas). Uma das principais causas da devastação das florestas são os incêndios, tendo-se assim de se dar a devida atenção ao seu combate quando se discute a produção florestal (Macedo & Sardinha, 1993).

O aumento do número de incêndios florestais que se verifica de ano para ano (Pereira *et al.*, 2006; Lourenço *al.*, 2012) radica num conjunto de fatores, onde se conjugam particularmente fatores climáticos, tipo e ordenamento da floresta dominante, bem como o despovoamento do interior, entre outros (Bento-Gonçalves *et al.*, 2010).

*Os Incêndios devastam tudo o que são árvores. coberto arbustivo, animais (desde a caça, os répteis e aos insetos) e alteram até, pelas altas temperaturas que se desenvolvem, a estrutura do solo.*

*Depois de carregadas pela água das chuvas, há quantidades enormes de terra que vão para os leitos das ribeiras e param nas barragens, onde diminuem a capacidade de armazenamento de água e não produzem nada (Costa, 1995, pág. 31).*

Assume assim uma importância relevante o investimento na prevenção dos incêndios florestais, o que envolverá principalmente o correto ordenamento florestal, sendo que *a floresta ordenada gera riqueza e, porque permite uma melhor defesa dos*

*fogos florestais, possibilita uma mais fácil conservação da natureza, um maior equilíbrio ambiental* (Lourenço, 1995, pág. 13).

É indispensável a adoção de medidas ao nível da gestão florestal e do ordenamento das áreas florestais que possam contribuir efetivamente para atingir o objetivo concreto de defesa da floresta contra os incêndios, permitindo a implementação das necessárias infraestruturas de prevenção que minimizem o risco de incêndio.

Assim, a prevenção dos incêndios florestais deve passar pela melhoria na sensibilização das populações, numa perspetiva silvícola, onde se privilegia o ordenamento florestal e a instalação de povoamentos seguindo normas preventivas contra incêndios.

*É, portanto, imperioso desenvolver estratégias que permitam mitigar o problema dos incêndios florestais, de forma a promover uma sustentável proteção do solo, dos recursos hídricos, da biodiversidade e demais valores ambientais, contribuindo para uma melhor qualidade do ambiente* (Vieira *et al.*, 2011, pág. 16)

## 1.2 - Noção de Incêndio Florestal

Antecedendo o desenvolvimento sobre a noção de incêndio florestal, é pertinente salientar o aspeto do fogo, que *resulta de uma reação química (combustão) entre um combustível e um comburente, normalmente o oxigénio, que se inicia se existir energia suficiente para desencadear essa reação.*

*A estes três elementos (combustível, comburente e energia de ativação), necessários para que se inicie a combustão e que constituem o triângulo do fogo, associa-se um quarto – a reação em cadeia – que permite a manutenção e o desenvolvimento de uma combustão com presença de chamas e que integra o tetraedro do fogo (Castro et al., 2003, pág. 9).*

Uma das grandes conquistas da humanidade foi o do uso e controle do fogo: o homem passou a poder cozinhar alimentos, iluminar as cavernas e a manter os animais afastados.

Aprendeu a realizar a ignição de um fogo, sem estar dependente de ocorrências naturais (p. ex. queda de raios), aprendeu a percutir duas pedras para obter faíscas ou a friccionar dois paus para produzir calor; assim como a controlar a intensidade do fogo colocando mais ou menos combustível.

Este controle sobre o fogo corresponde ao conceito de **fogo com combustão controlada** (ocorre sempre que se usam as lareiras com vista ao aquecimento doméstico (Figura3))



(Fonte: Lourenço et al., 2006)

Figura 3. Fogo: combustão controlada

Quando este controlo não está presente, como no caso de um incêndio numa área florestal (principalmente se estiver disponível muito combustível vegetal natural), o fogo

encontra as condições ideais para rapidamente se propagar e evoluir para grandes proporções. Nestas circunstâncias recebe a designação de **incêndio florestal** (Figura 4).



(Fonte: Lourenço *et al.*, 2006)

Figura 4. Incêndio florestal - Combustão sem controlo no espaço e no tempo

*O incêndio florestal pode, então, definir-se como uma combustão livre, não limitada no tempo nem no espaço, dos materiais combustíveis existentes nas áreas florestais (arborizadas ou incultas)* (Lourenço *et al.*, 2006, pág. 60).

A combustão é, pois, uma reação química em cadeia, que irá persistir enquanto existir combustível, calor e oxigénio em proporções convenientes. A ilustração do princípio da combustão é universalmente feita através de um triângulo com três lados iguais - **triângulo do fogo** (Figura 5)



(Fonte: Lourenço *et al.*, 2006)

Figura 5. Triângulo do Fogo

Assim, temos o combustível, isto é, as matérias ou produtos que serão consumidos (neste caso ramos secos, aparas, madeira, mato seco, etc.), o comburente que alimenta a combustão (o oxigénio presente no ar, no caso dos incêndios florestais) e o calor ou energia de ativação que permite que os dois primeiros elementos entrem em ação.

Porém, na combustão autossustentada e com chama, surge o efeito de reação em cadeia (Figura 6).



(Fonte: Lourenço *et al.*, 2006)

Figura 6. Tetraedro do Fogo

O quarto elemento (reação em cadeia), associado aos três elementos anteriores, dá origem ao **tetraedro do fogo**.

Por conseguinte, para evitar o início de um incêndio ou para extinguir os já iniciados, será necessário eliminar pelo menos um dos elementos: impedir, por exemplo, que as chamas alcancem o combustível, ou retardar o fogo (utilizando água, por exemplo, ou cobri-lo com terra) para evitar o seu contacto com o ar.

Os incêndios florestais são das catástrofes com componente natural mais graves em Portugal, não só pela elevada frequência com que ocorrem e extensão que alcançam, como pelos efeitos destrutivos que causam. Para além dos prejuízos económicos e ambientais, podem constituir uma fonte de perigo para as populações e bens.

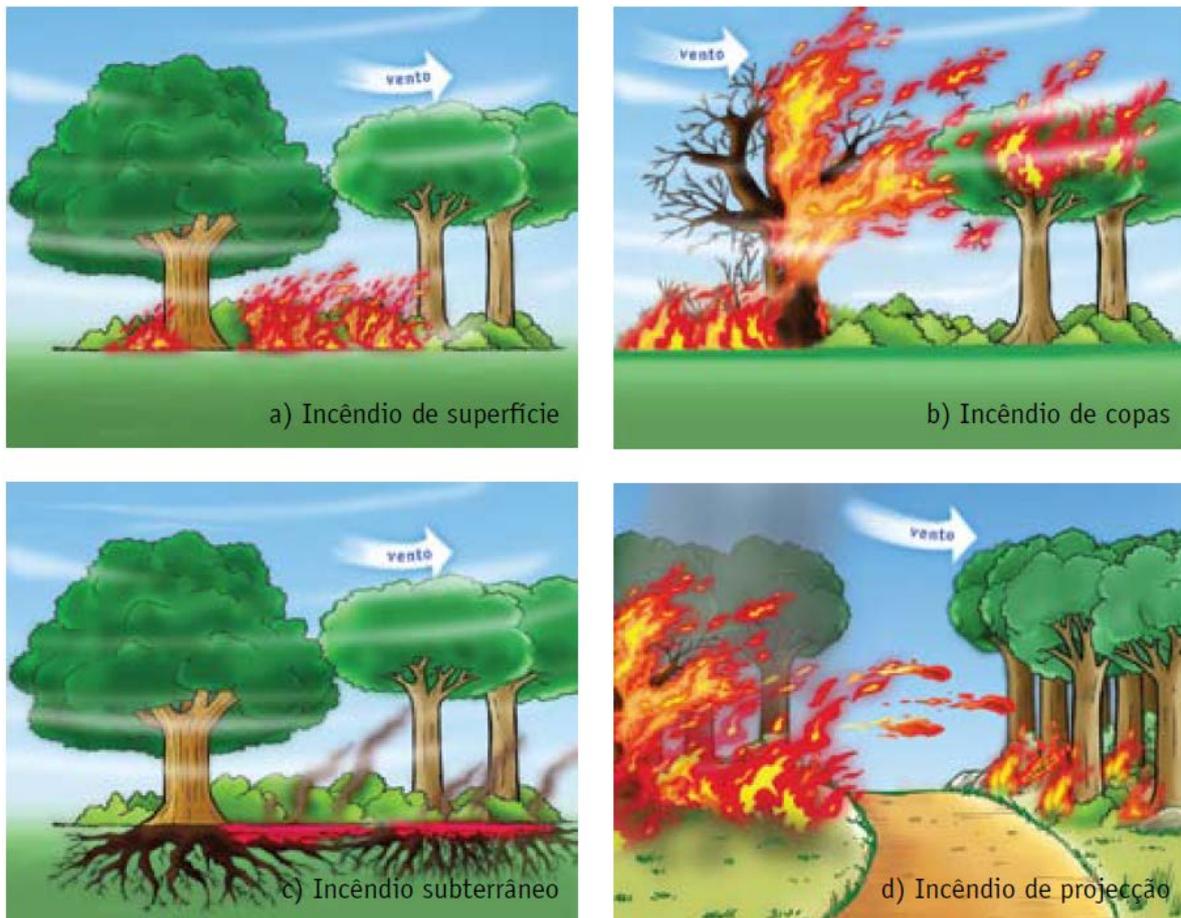
### 1.3 - Tipos de Incêndios Florestais

Em função da forma como se manifestam e se desenvolvem, os incêndios florestais são classificados da seguinte forma (Figura 7):

*a) - Incêndio de Superfície:* os que se originam nos estratos arbustivos e herbáceos, afetando também as árvores dominadas. Costumam ser os que ocorrem com mais frequência, já que o tipo de vegetação, ao acusar rapidamente a falta de humidade arde com facilidade; reunindo assim condições muito propícias ao início e propagação das chamas. Destaca-se que muitos dos incêndios das outras classes, têm o seu início como incêndios de superfície. Isto é, nos incêndios de superfície, as chamas propagam-se junto ao solo, sendo esta a principal forma de progressão dos incêndios florestais;

*b) - Incêndio de Copas:* estes desenvolvem-se no estrato arbóreo. Como a intensidade do vento se faz sentir mais ao nível das copas das árvores do que ao nível do

mato, o “fogo de copas” avança mais rapidamente que o de superfície, adiantando-se a este. É assim dificultado o seu combate pela elevada velocidade a que este incêndio se propaga;



(Fonte: Lourenço *et al.*, 2006)

Figura 7. Tipos de propagação de incêndios florestais através dos combustíveis

*c) - Incêndio de Subsolo:* propagam-se em materiais abaixo da superfície, alimentados por matéria seca, raízes e turfa, isto é, no raizame, dando-se muitas vezes a combustão com ausência das chamas, sendo de propagação lenta. Este tipo de incêndios necessita de especial estratégia no seu combate sendo que as chamas se podem manifestar à superfície em local ou locais distantes do ponto de origem;

*d) – Incêndio de projecção:* quando a sua propagação se efetua, essencialmente, pela projecção ou deslocamento de materiais incandescentes.

#### **1.4 - Causas dos Incêndios Florestais**

Relativamente às causas dos incêndios florestais, sabe-se que são numerosas, ao ponto de observarem agrupamento de acordo com a sua origem; e que a única causa alheia à intervenção humana são os incêndios florestais originados pela queda de raios.

Bento-Gonçalves (2007) aborda esta temática de uma forma detalhada na sua tese de doutoramento (para os concelhos de Cabeceiras de Basto e Vieira do Minho no período de 1957 a 1985), consolidando a origem dos incêndios nas seguintes causas: ponta de cigarro, exercícios militares, fogo atribuído a ato criminoso, queda de faísca ou descarga elétrica, ato negligente, acidente, suspeita de um dos proprietários de uma das propriedades afetadas, encontradas velas de cera a arder em diversos locais, ignora-se (presume-se que tenha sido originado por pastores).

A queima de pastagens, de resíduos agrícolas ou florestais e de desperdícios de lixos, a queima de lixeiras municipais, a realização de trabalhos e explorações na mata (realizados ou não com o auxílio do fogo), fogueiras acesas por excursionistas, desportistas e turistas e imprudências de fumadores são alguns exemplos de comportamento negligente.

Atos piromaniacos (cuja intenção é a de destruir sem colher benefícios diretos de tal ato), por interesses económicos vários, por conflitos de caça ou entre populações rurais, por brincadeiras das crianças que ateam fogo à floresta, são consideradas ignições intencionais.

Os incêndios florestais têm na maior parte dos casos origem na atuação do Homem, com ou sem intenções precisas ou de origem criminosa.

A maior parte dos incêndios florestais originados por comportamento negligente, podem ser evitáveis. Identificam-se de seguida algumas ações originadoras: queima dos lixos próximos de matos e florestas; lixeiras municipais que se mantêm a arder sem a aplicação das normas de controlo e segurança; queimadas com fins agrícolas (sem a aplicação das técnicas e cuidados adequados); lançamento de foguetes e balões (sem ter em conta as distâncias recomendadas e previstas na legislação); apicultura (devido à falta de cuidado na utilização dos fumigadores); fazer fogueiras durante os períodos de lazer (piqueniques) fora dos locais apropriados; instalações industriais e agrícolas que não estão suficientemente afastadas dos matos e florestas; máquinas e os motores que circulam e são utilizados sem as devidas proteções; linhas de alta tensão (sob as quais crescem os matos e árvores); diversos trabalhos agrícolas, florestais e industriais; abandono de objetos de vidro, latas e outros, que refletem e concentram os raios solares

e o abandono de restos de cigarros mal apagados, sobretudo pelos condutores e passageiros dos veículos que circulam pelos diferentes tipos de vias de comunicação.

Como foi observado, estas causas podem ser objeto de prevenção, pelo que é urgente a sensibilização da população, adequada a cada caso.

Quanto às causas intencionais (que originam o designado e muito falado "fogo posto"), e considerando apenas os casos em que a causa teve esta designação, identificam-se as seguintes: conflitos de caça; as pressões para a comercialização de material lenhoso; a piromania e o vandalismo; observação dos meios aéreos de combate; modificações no uso do solo; a presença de vida selvagem e as brincadeiras das crianças com fósforos e fogueiras.

Com a multiplicidade de fenómenos originadores dos incêndios florestais, atribuiu-se uma divisão entre causas diretas e indiretas, de acordo com Lourenço (1996).

As causas diretas dizem respeito ao fator que contribui para o desencadear da combustão e incluem três tipos: acidental, intencional e natural.

As causas diretas de tipo acidental incluem as relacionadas com atos de negligência, incúria e desleixo, enquanto que as intencionais têm a ver com as causas em que deliberadamente houve intenção premeditada de colocar fogo correspondendo, como tal, a ação criminosa. Por fim, as causas naturais dizem respeito a situações em que fenómenos naturais podem originar fogos florestais, como acontece com as faíscas produzidas por trovoadas secas.

Já as causas indiretas, não só são as mais difíceis de eliminar, mas também são as principais responsáveis pela existência de incêndios florestais, podendo subdividir-se em causas de natureza física e humana.

Em relação às causas de natureza física, contam-se a existência de condições meteorológicas favoráveis ao desenvolvimento de incêndios florestais ou orografia com declives muito acentuados que facilitam a progressão.

Em relação às causas de natureza humana destacam-se a falta de preparação e limpeza das matas, resultante do tipo e composição da nossa floresta, pelo elevado grau de combustibilidade das principais espécies (pinheiro bravo e eucalipto), pela existência de um coberto florestal denso, por vezes com um sub-bosque cerrado e, ainda, pela existência de redes divisionais e viárias deficientes. Também as alterações na estrutura das populações residentes em áreas florestais, sobretudo com o surto de desenvolvimento industrial registado nos anos 60, que levou ao despovoamento dos espaços rurais e à mudança de atitude perante o fogo aos ainda aí residentes, facilita a sua progressão.

Também as práticas rurais, como as queimadas e os foguetes tipicamente lançados em épocas festivas, contribuem para o espoletar dos fogos (Lourenço, Fernandes, *et al.*, 2012).

Por fim, a crescente penetração de vias de comunicação no espaço florestal permite às pessoas um refúgio ao *stress* urbano, levando consigo hábitos como fumar e a realização descuidada de piqueniques que poderão desencadear incêndios florestais.

O ser humano é, como previamente constatado, quem normalmente está na origem do fogo, pelo que havendo vontade para tal é possível evitar a sua ocorrência, concretizando a velha máxima "*Os fogos não se apagam. Evitam-se*".

### **1.5 - Consequências dos Incêndios Florestais**

A floresta tem sido, ao longo dos últimos anos, alvo de danos significativos quer em termos de área ardida quer em destruição de espécies singulares.

Assim, os efeitos são muito variados, sendo o mais evidente *a destruição, pela combustão, de grandes volumes de materiais lenhosos e de vegetais, mas produz também, por ação do calor desenvolvido sobre as plantas, animais e solo, consequências menos evidentes, algumas das quais não se revelam imediatamente ou são difíceis de detetar, constituindo ações deletérias ou alterações de natureza física, química e biológica sobre aqueles elementos. Indícios dessas alterações são as camadas de material carbonizado existente no subsolo, cicatrizes nas árvores, uniformidade etária dos povoamentos, relatos de exploradores, etc...* (Macedo & Sardinha, 1993, pág. 87).

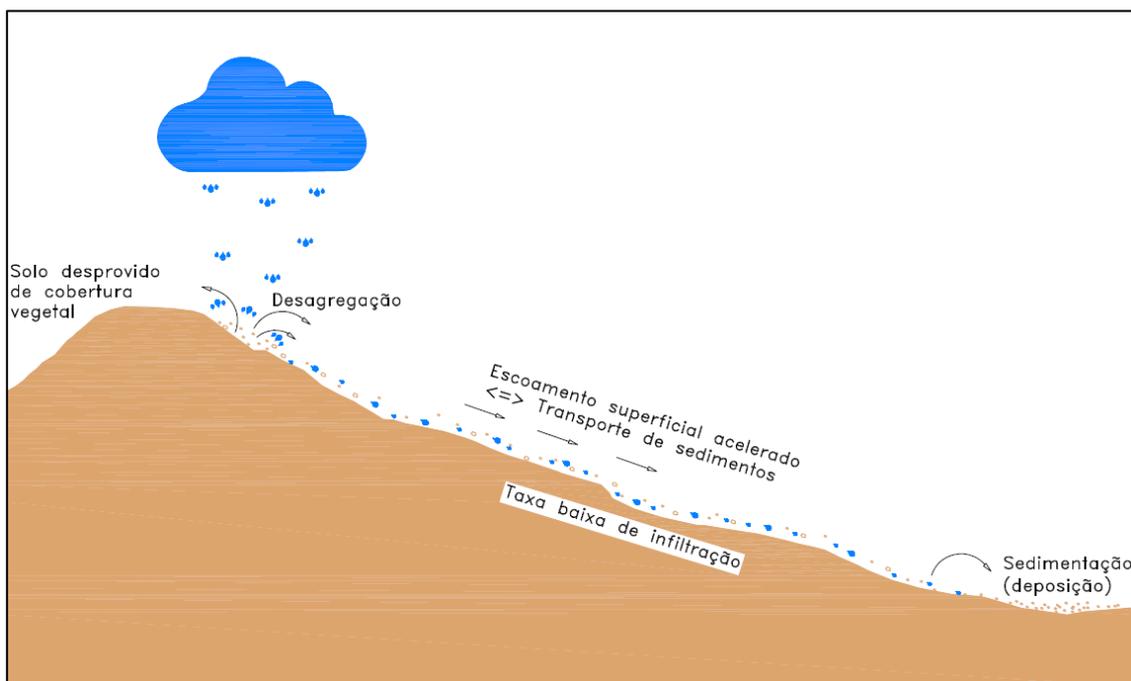
*Igualmente de grande complexidade é a compreensão das consequências dos incêndios florestais, ou melhor dizendo, da malha de consequências que ocorrem de imediato, a médio e longo prazo, de forma direta, indireta ou cumulada, às escalas micro e macro, até a global, nos diferentes componentes ambientais e nas relações entre eles.* (Bento-Gonçalves, 2007, pág. 230)

Os incêndios florestais consomem, assim, juntamente com a floresta, colheitas, equipamentos, animais, habitações e, por vezes, vidas humanas.

A destruição da vegetação e, conseqüentemente, da proteção que ela oferecia, leva a que os microclimas se alterem, nomeadamente os que existem junto ao solo, deixando-o exposto a amplitudes térmicas muito mais acentuadas e diminuindo-lhe a humidade nas camadas mais superficiais.

Uma área devastada por um incêndio florestal, quando sujeita a chuvas intensas, pode tornar-se mais suscetível e originar mais facilmente outro tipo de riscos, tais como deslizamentos e cheias.

A destruição da camada superficial vegetativa leva a que os solos fiquem mais vulneráveis a fenômenos de erosão e transporte provocados pelas águas pluviais (erosão hídrica), reduzindo também a sua permeabilidade, como se pode observar no esquema da Figura 8.



(Fonte: Adaptado de LFS: SoilWeb)

Figura 8. Esquema das fases do processo de erosão

Isto é, a falta de vegetação provoca ainda a diminuição das taxas de infiltração e o aumento das velocidades de escoamento superficial, podendo assim acelerar a atuação dos processos morfogenéticos.

Outra consequência importante vem da necessidade ocasional de se proceder à reflorestação, onde a preparação dos terrenos é feita por máquinas pesadas, provocando assim a movimentação superficial dos solos. Este remeximento facilita os processos de meteorização, já intensificados pela falta de vegetação, deixando grandes quantidades de partículas minerais disponíveis (soltas) para depois serem levadas pelas águas pluviais.

Vieira (2009) constatou que se verificava *frequentemente, a ocorrência de desagregação granular por ação dos efeitos de incêndios* (pág.. 231).

Mas, para além da destruição da flora e do acelerar da erosão dos solos, os incêndios florestais têm também como consequência a alteração da fauna que habitava as áreas que foram queimadas, provocando a destruição e a morte de animais e o aumento anormal de insetos, podendo chegar à constituição de verdadeiras pragas.

Por outro lado, verificam-se consequências diretamente relacionadas com o ser humano sendo a mais grave a perda de vidas humanas, mas também diminuição/erradicação do potencial económico que a floresta oferecia enquanto recurso bem como de um elevado número de postos de trabalho dependentes da floresta.

De acordo com a perspectiva de Lourenço *et al.*, (1991), quando se procede à análise das consequências dos incêndios florestais temos de avaliar os efeitos imediatos e os subsequentes.

Os efeitos imediatos ocorrem logo após o fogo, isto é, são produzidos durante o período de tempo em que decorre o sinistro e relacionam-se com a combustão do material lenhoso e de vegetais, levando à formação de densas colunas de fumo, que poluem a atmosfera e tornam o ar irrespirável.

Contudo, para além da flora, também a fauna é destruída ou é forçada ao êxodo, e os solos são profundamente afetados nas suas características físicas e químicas, verificando-se ainda a destruição de bens materiais e culturais.

Já os efeitos subsequentes são aqueles que se fazem sentir muito tempo depois. Ocorrem ao nível da vegetação, pois as árvores que escapam ao fogo ficam debilitadas - sendo atingidas por pragas e doenças. As árvores queimadas são cortadas e retirados os troncos, alterando a paisagem.

Também a inexistência de vegetação vai provocar a alteração do clima junto ao solo, acentuando as amplitudes dos valores da temperatura e humidade relativa do ar, bem como a velocidade do vento. Esta alteração do clima leva, conseqüentemente, à alteração da macrofauna do solo, quer devido à redução temporária de certas espécies (lesmas, caracóis, minhocas, aranhas...), quer ao aumento temporário de outras (como formigas, ou gafanhotos), comportamento que se observa também em relação às aves e mamíferos.

Os efeitos tanto imediatos como consequentes, dos incêndios florestais, como já referido, têm repercussões quer ao nível socioeconómico como ao nível ecológico, como podemos verificar de seguida.

Ao nível socioeconómico refletem-se em gastos com os meios de prevenção e combate, na redução do valor turístico, na perda de produção de madeira e seus derivados, de postos de trabalho, na diminuição do valor das exportações.

A nível ecológico é praticamente impossível determinarem-se todos os efeitos, pois os impactes provocados no meio ambiente são de tal forma intrincados e numa quantidade tal que se torna deveras complicado aferir todas as consequências (Lourenço *et al.*, 1991).

As repercussões verificam-se na erosão e degradação do solo, nas alterações climáticas, na desregularização do escoamento das águas, nos assoreamentos, na diminuição da renovação do oxigénio do ar, no empobrecimento da diversidade da flora e da fauna e na destruição e alteração da paisagem.

Deve-se assim agir no sentido de prevenir os incêndios florestais, sendo praticamente impossível reverter todas as suas consequências.

### **1.6 - Erosão dos solos em áreas ardidas**

Das consequências dos incêndios florestais, uma das mais importante está relacionada com a intensificação da erosão do solo (particularmente a erosão hídrica), especialmente nas áreas serranas, onde os declives alcançam valores mais elevados e, conseqüentemente, a erosão será mais acentuada. *Os incêndios florestais, que normalmente ocorrem no período estival, removem grande parte da cobertura vegetal protetora do solo, desprotegendo-o e permitindo a atuação erosiva da precipitação, que normalmente acontecem no outono e inverno que lhe seguem, traduzindo-se em efeitos bastante perniciosos para o solo, quer pela remoção de sedimentos, quer mesmo de nutrientes* (Vieira *et al.*, 2020).

*Assim, como consequência dos incêndios, e entre outros impactos, o solo fica exposto à ação erosiva da chuva determinando perdas de solo muito significativas e a degradação deste recurso* (Lima, 2016, pág. i).

As consequências ao nível do solo revestem-se de uma complexidade notável devido às múltiplas variáveis envolvidas e à forma como essas variáveis se encontram interrelacionadas.

Os efeitos diretos e indiretos dos incêndios florestais notam-se ainda ao nível dos solos, onde os efeitos diretos são essencialmente constituídos pelas alterações geradas pela ação do calor sobre a componente orgânica, traduzindo-se principalmente na mineralização da matéria orgânica existente nos solos, que ficam desta forma mais expostos aos processos hidrológicos e erosivos; já os efeitos indiretos, advêm do desaparecimento da proteção proporcionada pelo coberto vegetal e da folhada das

árvores, originando uma maior suscetibilidade dos solos à erosão e a uma alteração considerável do regime hidrológico.

É de notar que os efeitos do fogo não se fazem sentir apenas nas áreas percorridas pelo fogo, verificando-se frequentemente repercussões a jusante dessas áreas, resultante do movimento da água e dos sedimentos que transporta.

*Os fogos produzem todo um espectro de impactos mais ou menos severos sobre o solo, que dependem de múltiplos fatores, incluindo: o regime de fogo, a meteorologia, a vegetação, o tipo de solo e o relevo (Neary et al., 1999, pág. 51).*

O incêndio pode afetar o solo de três formas distintas: pela exposição, deixando o solo a descoberto, pelo aquecimento e pela libertação de nutrientes. O grau de aquecimento do solo durante o incêndio é variável e depende do tipo de combustível (vegetação herbácea, arbustos e árvores), da intensidade do fogo, da natureza da camada orgânica (espessura e conteúdo de humidade), e das propriedades do solo (matéria orgânica, teor de humidade, textura) (Batista et al., 1997)

Quando a vegetação e a manta morta são devoradas pelos incêndios, o solo fica exposto, desprotegido e mais sujeito ao salpico direto das gotas de chuva. Esse impacto direto das gotas sobre o solo promove a sua compactação e o entupimento dos poros com materiais mais finos. A infiltração torna-se quase inexistente, aumentando a escorrência superficial - que por sua vez arrasta partículas do solo e causa a erosão.

O grau de aquecimento do solo durante o incêndio é variável e depende do tipo de combustível (vegetação herbácea, arbustos e árvores), da intensidade do fogo, da natureza da camada orgânica (espessura e conteúdo de humidade), bem como das propriedades do solo (matéria orgânica, teor de humidade, textura) (Batista et al., 1997).

Os incêndios florestais são conhecidos por incrementarem a repelência do solo à água, imediatamente abaixo das cinzas, (Giovannini, 1987). De acordo com Giovannini (1994) os incêndios com temperaturas acima dos 450°C (aproximadamente) acentuam o aumento da escorrência e o risco de erosão, induzindo a repelência à água dificultando assim a infiltração.

*Os incêndios florestais afetam o desencadear da escorrência e da erosão do solo, alterando as características hídricas do topo do solo (Vieira e Costa, 2015, pág. 37).*

Relativamente à perda de nutrientes devido ao fogo, Bárcenas e Díaz (2013) afirmam que *os microrganismos, apesar de seu tamanho pequeno ( $5 \times 10 \mu\text{m}^3$ ), são os componentes mais importantes do solo, pois são os responsáveis pelo seu comportamento*

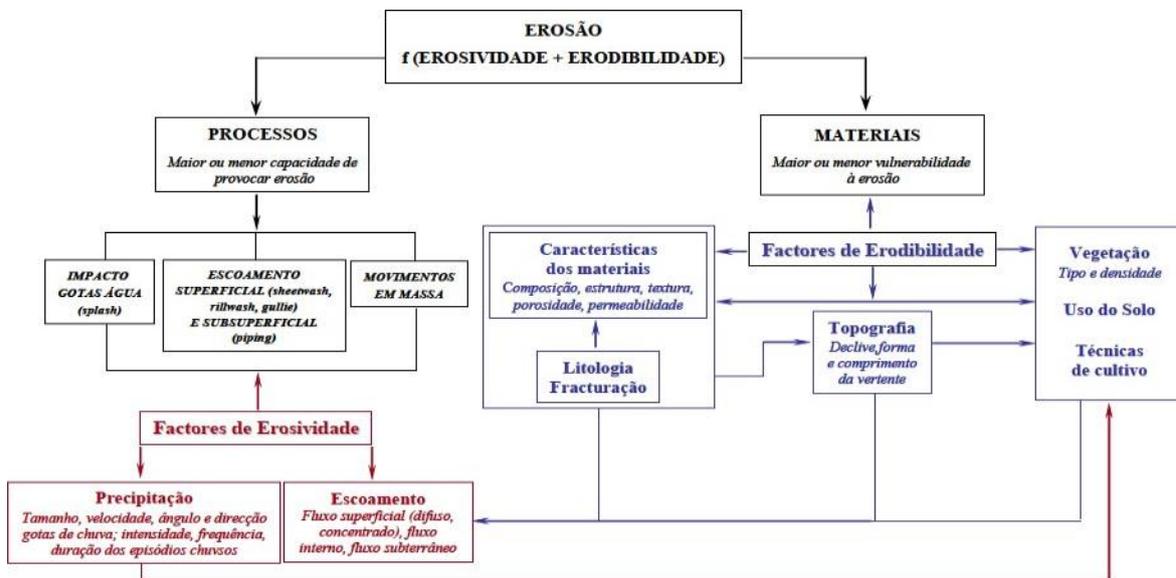
como um sistema vivo e dinâmico em contínua evolução (80 - 90% dos processos e reações que ocorrem no solo é mediada por microrganismos)(pág. 1).

A importância que possuem tem direta correspondência com a fragilidade da sua existência, verificando-se a sua destruição quando as temperaturas ultrapassam os 120°C.

Nestas condições verifica-se uma esterilização parcial do solo, principalmente nos 0 - 2,5 cm superiores e conseqüentemente a densidade, a biomassa e a atividade microbiana diminuem consideravelmente até atingir níveis muito baixos e até indetetáveis (Bárceñas-Moreno & Díaz-Raviña, 2013, pág. 3).

Como indicado, de acordo com Vieira e Costa (2015), denota-se uma relação entre o solo e os elementos hídricos, após a ocorrência de um incêndio florestal, pelo que é de mencionar a erosão hídrica.

Esta encontra condicionantes num conjunto de fatores que atuam de forma integrada, dependendo, por um lado, da quantidade/duração/intensidade da precipitação e da forma como se processa o escoamento (fatores de erosividade) – que em parte controlam o tipo de processos que serão desencadeados - e, por outro, de parâmetros relacionados com os materiais e o contexto morfoestrutural e antrópico em que se enquadram (fatores de erodibilidade), influenciando a maior ou menor suscetibilidade à atuação dos processos erosivos (Soares, 2008) (Figura 9).



(Fonte: Extraído de Laura Soares, 2008)

Figura 9. Inter-relação entre os fatores que condicionam a erosão

Conclui-se que os incêndios florestais provocam alterações significativas em vários componentes do ciclo hidrológico, nomeadamente ao nível da interceção pela copa

das árvores (ao eliminar esta barreira, as gotas atingem o solo com mais violência), na evapotranspiração para a atmosfera, na diminuição da capacidade de infiltração dos solos e na celeridade com que a água chega aos cursos de água e aos aquíferos, influenciando assim o caudal de base e os picos de cheia das bacias hidrográficas.

## **2 – Simulação de chuvas: metodologias utilizadas e aplicações em erosão dos solos e particularmente na erosão dos solos em áreas ardidas.**

### **2.1 - A necessidade da chuva artificial nos estudos de erosão hídrica**

Na precipitação está compreendida toda a água meteórica, isto é, a água proveniente da chuva, chuvisco, aguaceiro, neve, granizo, orvalho e geada. Sendo originária do vapor de água da atmosfera, retorna assim à superfície da Terra.

Pela sua importância em gerar escoamento, a chuva é o tipo de precipitação mais importante em hidrologia. As características principais englobam o seu total, a duração e ainda o modo como se distribui no espaço e no tempo.

A quantidade de precipitação numa região é fundamental para a determinação, entre outros, das necessidades de rega de culturas ou do abastecimento doméstico e industrial. Já a intensidade de precipitação é importante para a determinação das pontas de cheia e determinante nos estudos de erosão.

A quantidade de precipitação só tem significado quando associada a uma duração: por exemplo, valores na ordem dos 100 mm podem representar pouco para um mês da estação húmida, assumindo, contudo, um impacto superior se ocorrer num único dia, e podendo constituir uma raridade se se verificar numa hora.

A ocorrência de precipitação é um fenómeno puramente aleatório que não possibilita previsões com elevada antecedência. Por isso, o tratamento dos dados de precipitação passa, na maioria dos casos, por aplicação de técnicas de inferência estatística no sentido de obter uma estimativa estatisticamente significativa quanto à magnitude dos eventos pluviosos em função de uma dada probabilidade de ocorrência.

Para que haja precipitação, é necessário que ocorra um desequilíbrio térmico ao nível das nuvens provocado pela condensação do vapor de água, sempre que a temperatura desce abaixo do ponto de saturação da massa de ar. Todavia, a condensação, individualmente, não conduz a um aumento das gotas de água ao ponto de se verificar o seu desprendimento e queda, pela ação da gravidade. É necessário que ocorra em simultâneo a fusão sucessiva das micro gotas, que vão assim aumentando de tamanho – denominado de processo de coalescência direta (Rodrigues *et al.*, 1986).

Segundo Pedro Rodríguez (2015), o estudo dos processos hidrológicos e erosivos dos solos é frequentemente baseado na análise das taxas de escoamento e infiltração das

águas pluviais, bem como da intensidade de transporte de sedimentos por fluxo de água superficial.

Este estudo assume um relevo significativo em áreas com risco de erosão hídrica, como as que se localizam em zonas de clima mediterrânico ou mais árido.

Na região do Mediterrâneo, por exemplo, o clima é caracterizado por um verão quente e seco seguido por uma estação fria e chuvosa. Assim, além da ocorrência de concentração de chuvas numa temporada húmida e com alta irregularidade interanual, a precipitação das zonas climáticas categorizadas como mediterrânicas observa uma amplitude significativa quanto à intensidade desde muito amena a torrencial.

Deste modo, e tendencialmente no início da estação chuvosa, existe um elevado risco de erosão hídrica, já que o solo se encontra mais desprotegido.

A degradação do solo provocada por este tipo de erosão merece especial atenção, pois facilmente causa danos irreversíveis – originando por exemplo a perda de solo fértil - e é uma das causas de desequilíbrios ecológicos (Fufa *et al.*, 2002).

Por outro lado, como referido no capítulo anterior, os incêndios florestais produzem alterações de natureza física, química e biológica nos solos.

Uma das consequências imediatas, observáveis na sequência dos incêndios florestais, é a perda de amplos recursos florestais e subsequente perda de biodiversidade e de produção florestal.

Contudo, apesar de menos visível, a perda e degradação do solo assume porventura maior relevância, uma vez que constitui a base fundamental para o desenvolvimento da floresta e demais recursos bióticos (Vieira *et al.*, 2011).

Uma das grandes dificuldades quando se pretende estudar o risco de erosão hídrica do solo está relacionada com a complexidade na previsão quanto a localização física e intervalo temporal da ocorrência de chuvas, além de que não ser possível saber se o evento terá a intensidade e duração necessárias para a ocorrência de erosão (Cohen & Asseline, 1999).

Por outro lado, não é possível a reprodução das condições naturais na íntegra, devido a limitações físicas, como por exemplo a altura de onde a chuva cai. A distância que as gotas de chuva percorrem durante a queda resulta na aquisição de energia cinética particular que provocará determinado impacto ao atingirem o solo, sendo estas duas variáveis unicamente relacionadas com cada evento.

Encontra-se, assim, a necessidade de se criar uma ferramenta de trabalho para a realização desses estudos – os simuladores de chuva.

Enquanto os eventos naturais são altamente variáveis, nos ensaios reproduzidos com simuladores de chuva é possível, de forma geral, a replicação das condições, mantendo constantes os parâmetros de distribuição, intensidade, duração ou velocidade da queda (Iserloh *et al.*, 2012).

Porém, para uma interpretação fiável dos dados obtidos, é necessário que a chuva simulada produza um impacto semelhante ao da chuva natural, e parâmetros como a taxa de escoamento ou a perda de solo devem ser cuidadosamente analisados.

De acordo com Meyer (1994), Meyer & McCune (1958) e Bubbenzer *et al.* (1979), as principais características da precipitação natural que devem ser simuladas são a distribuição uniforme, o número aleatório de gotas de chuva na superfície analisada, a distribuição do tamanho do gotas de chuva, a energia cinética, a velocidade terminal das gotas de chuva no momento de impacto na superfície do solo, assim como a intensidade da chuva.

Atualmente os simuladores de chuva são usados para estudar os processos hidrológicos (infiltração e escoamento) e erosivos (Asensio *et al.*, 2012), tanto no laboratório como no campo, pois são confiáveis, rápidos, eficientes permitindo ainda um grande controlo de todos os parâmetros necessários, tornando válida a comparação dos resultados obtidos com eventos naturais (Donald, 1988).

Os simuladores permitem avaliar alguns parâmetros, como por exemplo a taxa de infiltração, o índice de escoamento, o desprendimento e desagregação de partículas, a concentração de escoamento incipiente e as taxas de transporte de sedimentos associados, que em muitos casos são condicionados pela cobertura vegetal ou a composição da vegetação, bem como a presença de outros elementos (presença de pedras ou selagem superficial) (Le Bissonnais *et al.*, 2005; Martínez-Zavala & Jordán, 2008; Seeger, 2007).

Os simuladores de chuva devem ser concebidos para aplicar água no solo de uma forma semelhante à chuva natural, pelo que é essencial possibilitarem o controlo da quantidade de precipitação, da sua intensidade e duração.

No entanto, uma análise a alguns dos simuladores de chuva atualmente existentes mostra que a maioria deles não consegue simular um fluxo de energia característico ao de uma chuva natural (Abudi *et al.*, 2012).

A simulação de chuva tornou-se num método importante para estudar a erosão do solo, assim como os processos hidrológicos superficiais e subterrâneos (Cerdà, 1999).

Uma outra desvantagem é que alguns simuladores de chuva possuem um design e manuseio demasiado complexos, assim como uma área de trabalho relativamente limitada

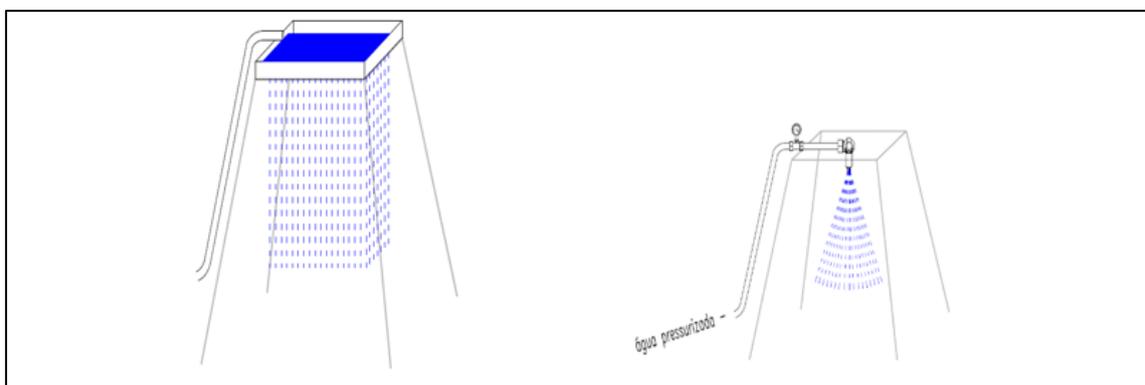
(geralmente inferior a 1 m<sup>2</sup>) (Abudi *et al.*, 2012; Hignett *et al.*, 1995; Wildhaber *et al.*, 2012).

## 2.2 - Principais características dos simuladores de chuva

Na literatura científica, podem ser encontradas referências a uma grande diversidade de simuladores de chuva que têm sido usados por diferentes investigadores. O tipo e as características do simulador devem adaptar-se aos objetivos dos ensaios que se pretendem realizar, tendo sempre em vista o custo do investimento relacionado com a sua aquisição (Benito *et al.*, 2001).

Uma vasta quantidade de simuladores atualmente disponíveis, são instrumentos de laboratório adequados para trabalhar com amostras de solo em recipientes rasos. A simulação de chuva aplicada a essas amostras pode possibilitar obter alguns resultados pertinentes quanto aos processos de superfície, mas os resultados podem ser muito diferentes daqueles observados em condições de campo (Abudi *et al.*, 2012).

De acordo com Benito Rueda *et al.* (2001), existem essencialmente dois tipos de simuladores de chuva (Figura 10): simuladores que produzem gotejamento (gotejadores ou gotas não pressurizadas) e simuladores baseados no uso de bicos de pulverização (aspersores ou simuladores de bico pressurizado).



	Gotejadores ou gotas não pressurizadas	Aspersores ou simuladores de bico pressurizado
<b>Velocidade inicial da queda das gotas:</b>	Praticamente igual a zero (gravítica)	Depende da pressão da água
<b>Altura de queda:</b>	10 a 12m	± 2m
<b>Aleatoriedade da distribuição:</b>	Quase inexistente	Elevada
<b>Facilidade de transporte:</b>	Difícil (estruturas mais pesadas)	Fácil. Equipamento de menores dimensões

Figura 10. Tipos de simuladores de chuva

No primeiro caso (simuladores que produzem gotejamento) a velocidade inicial da queda é praticamente igual a zero, pois a água cai unicamente pela ação da gravidade. Desse modo, é necessário colocar o gotejador a altura elevada, de modo a simular um impacto natural sobre a superfície do solo (Barros *et al.*, 2008).

Alguns autores observaram que os simuladores de chuva por gotejamento podem apresentar algumas limitações devido à dificuldade do seu manejo no campo e a dificuldade de imitar a chuva natural, sendo mais adequado para estudos em condições de laboratório (Cerdà *et al.*, 2010). Além disso, para que a energia cinética da queda no momento do impacto no solo seja a adequada, é necessário prever alturas de queda na ordem dos 10 e 12 m (Benito Rueda *et al.*, 2001; Epema & Riezebos, 1983).

Outra desvantagem observada na utilização deste tipo de simuladores (do ponto de vista de imitar chuva natural) é a ausência de aleatoriedade na distribuição dos impactos, uma vez que todas as gotas produzidas pelo mesmo gotejador impactam o mesmo ponto da superfície do solo. Numa tentativa de colmatar essa restrição incluíram mecanismos para introduzir aleatoriedade na distribuição espacial e no tamanho de quedas, como a aplicação de movimento ou vibração (Kleijn *et al.*, 1979; Poesen, 1984), a colocação de malhas entre os gotejadores e o solo (Imeson *et al.*, 1982) ou o uso de ar comprimido (Brakensiek *et al.*, 1979).

Além disso, em muitos casos, detetou-se uma dificuldade adicional: na procura pela simplificação dos sistemas optou-se pela colocação dos depósitos de água na parte superior do simulador (pelo que a água caía por gravidade); no entanto, esse peso conferia-lhes grande instabilidade.

Apesar das limitações referidas, os simuladores de gotejamento também apresentam algumas vantagens, como por exemplo a possibilidade de se controlar a distribuição espacial da chuva variando o arranjo do gotejador ou mudando a pressão da água (Mutchler & Hermsmeier, 1965).

Embora o tamanho das gotas apresentem pouca variação em cada modelo de simulador, diferentes modelos ou acessórios podem proporcionar dimensões distintas, normalmente entre 2,2 mm de diâmetro médio da gota (Bubenzer & Jones, 1971) até 5,6 mm (Adams *et al.*, 1957).

O segundo grupo de simuladores são os baseados no uso de bicos de pulverização, que impulsionam a água a uma determinada velocidade, obtendo energia cinética semelhante à ocorrida naturalmente (Laws, 1941). Dependendo do bico selecionado, é

possível obter-se chuvas de intensidade e energia diferentes, permitindo adaptar o ensaio às condições específicas de cada local em estudo.

No entanto, a principal desvantagem desses simuladores é que eles apenas permitem uma distribuição do tamanho de gota semelhante ao natural que é alcançada em intensidades de chuva relativamente altas.

Existem mecanismos corretivos, como o uso de discos rotativos (Morin *et al.*, 1967) ou de sistemas oscilantes (Neibling *et al.*, 1981). Na opinião de Cerdà *et al.* (2010), os simuladores que utilizam mecanismos de pulverização são adequados tanto para uso em laboratório como em trabalhos de campo (inclusive em zonas de difícil acesso).

Os simuladores de chuva empregados em ensaios de campo, principalmente se utilizados em áreas de difícil acesso, devem possuir as seguintes características: facilidade de transporte, disponibilidade de fonte de energia e baixo consumo de água.

### **2.3 - Antecedentes e evolução**

A recessão pós-Primeira Guerra Mundial, levou muitos agricultores a estabelecerem-se na região do sudoeste das Grandes Planícies dos Estados Unidos.

Aí introduziram uma lavoura extensiva (produção de cereais) nos solos virgens das Grandes Planícies, utilizando novas técnicas de agricultura mecanizada.

No início da década de 1930 as grandes produções fizeram baixar os preços, forçando os agricultores a incrementar ainda mais as colheitas para pagar as suas terras e as suas dívidas.

A combinação de técnicas agrícolas extensivas e intensivas, juntamente com a ocorrência de condições de seca e ventos fortes, criou enormes tempestades de poeira que obrigou milhares de pessoas a abandonarem as suas casas.

Este fenómeno climático recebeu a designação de Dust Bowl (“taça de pó”) e ocorreu em três eventos (1934, 1936 e 1939-1940), mas algumas regiões das Planícies Altas experimentaram condições de seca por quase oito anos (Figura 11).

Foi um desastre económico e ambiental que afetou severamente boa parte dos Estados Unidos da América naquela altura.



(Fonte: <http://www.photolib.noaa.gov/htmls/theb1365.htm> (domínio público))

Figura 11. Dust Bowl: tempestade de pó próxima de Stratford, Texas, abril 1935

Na sequência dos episódios de Dust Bowl, intensificou-se a investigação que levaria ao desenvolvimento da *Universal Soil Loss Equation* (Wischmeier & Smith, 1978) e, conseqüentemente, à quantificação dos processos erosivos, e ao estudo da erosividade da chuva mediante o tamanho das gotas de chuva (Laws & Parsons, 1943) e à avaliação da erodibilidade dos solos, juntamente com os estudos da hidrologia de encostas (Horton, 1939).

As pesquisas relacionadas com o risco de erosão e do comportamento hidrológico do solo englobavam procedimentos que reproduziam parcialmente a realidade, como medições com infiltrômetros cilíndricos ou inundação de parcelas (Navas *et al.*, 1990).

No entanto, o objetivo dos primeiros simuladores de chuva não era o de medir a erosividade da precipitação, mas sim promover a distribuição da água em toda a superfície em ensaio.

A percepção de que a erosividade da chuva depende do tamanho da gota e da velocidade alcançados durante a precipitação (Laws, 1941) (Spilhaus, 1948) levaram ao desenvolvimento de novos modelos de simuladores de chuva.

Ao longo do seu desenvolvimento tem havido uma clara tendência para tornar os simuladores mais manuseáveis e acessíveis, pois originalmente eram instrumentos pesados, caros e difíceis de transportar, o que dificultava a sua utilização em zonas de difícil acesso.

Não há padrões universais para a construção de um simulador de chuva, pois cada simulador depende, em última análise, das propriedades que se pretende que ele seja capaz de replicar (Arnáez *et al.*, 2019).

Iserloh *et al.* (2013) realizaram um estudo comparativo entre 13 simuladores portáteis de chuva, com o objetivo de analisar as diferenças e semelhanças mais importantes entre eles. Compararam o tamanho das gotas, a velocidade de queda e a distribuição espacial, com o objetivo de mostrarem a necessidade de se estabelecer um critério unânime na avaliação dos dados obtidos pelos diferentes simuladores, uma vez que as diferenças entre os dados obtidos com os diferentes equipamentos poderiam originar resultados díspares nos parâmetros calculados.

Bowyer-Bower & Burt (1989) também compararam diversos simuladores de chuva avaliando as suas capacidades de simularem precipitações representativas da sua ocorrência natural, com a precisão de replicação necessária para gerar dados significativos.

Chegaram à conclusão que planejar um simulador que fosse adequado para todas as condições experimentais não era um projeto viável, uma vez que diferenças aparentemente pequenas entre diferentes ensaios levariam à obtenção de dados enganosos.

É necessário ter em conta que durante um evento de chuva a intensidade não é constante, pois apresenta variações aleatórias. Além disso, a resposta hidrológica do solo pode variar durante o mesmo episódio de precipitação, já que devido ao impacto das gotas e do escoamento superficial verificam-se processos de dispersão de sedimentos, desagregação de partículas, vedação da superfície e oclusão de poros, o que por sua vez afeta as taxas de infiltração e escoamento, bem como a produção e transporte de sedimentos.

Uma desvantagem encontrada na maioria dos simuladores de chuva é a impossibilidade de se variar a intensidade das chuvas durante um mesmo ensaio.

A produção de precipitação artificial com variações de intensidade, implicava em muitos casos a interrupção do ensaio para permitir a substituição do tanque de gotejamento ou dos bicos difusores.

Neste trabalho é proposto a construção de um simulador de chuva de baixo custo, portátil (pode ser desmontado e transportado por duas ou três pessoas), e que permite ao longo de um ensaio programar o uso de diferentes intensidades de chuva durante determinados intervalos de tempo.

### **3 – Projeto – Construção de um simulador de chuva**

A floresta Portuguesa tem sofrido, desde finais da década de 1970, impactes significativos resultantes dos inúmeros incêndios florestais que sistematicamente se verificam.

Como os solos (componente fundamental ao suporte de vida) são um dos elementos particularmente vulneráveis, sofrendo alterações significativas de natureza física, química e biológica aquando da ocorrência de incêndios, é sensato incidir neles particular atenção.

Uma das alterações apuradas é a intensificação da erosão hídrica nas áreas ardidas, onde se verifica uma aceleração na remoção de material superficial, conduzindo ao empobrecimento do solo e em situações extremas à desertificação (Vieira e Bento-Gonçalves, 2021).

Verificou-se que os fogos florestais são mais concentrados no litoral Norte, entre Douro e Minho. Numa área de 10% do continente, registaram-se 40% do total do número de incêndios (Lourenço & Malta, 1993).

Encontrando-se o Departamento de Geografia da Universidade do Minho geograficamente localizado tão próximo destas ocorrências, é pertinente, a realização de estudos que permitam esquadrihar o melhor possível todas as consequências que esta tragédia encerra.

Quando se pretende estudar o risco de erosão hídrica do solo, há que aguardar pela ocorrência de chuvas; mas é extremamente complexo prever-se quando e onde vai chover, além de que não é possível saber se o evento terá a intensidade e a duração necessárias para produzir erosão.

Assim surgiu a necessidade de se criar uma ferramenta de trabalho que permitisse a realização desses estudos – os simuladores de chuva.

Os simuladores de chuva devem ser concebidos para aplicar água no solo de uma forma semelhante à da chuva natural, permitindo controlar a quantidade de precipitação, a sua intensidade e duração (Cerdà, 1999).

Como o Departamento não tinha disponível nenhum simulador (para nos permitir realizar análises da erosão dos solos em áreas ardidas), após uma pesquisa, constatamos que existem poucas empresas comerciais a fornecerem este equipamento; e os que encontramos eram muito caros.

Por outro lado, descobrimos que vários investigadores haviam construído os seus próprios simuladores de chuva, tendo em vista os parâmetros que pretendiam analisar as particularidades e necessidades das suas investigações.

Propusemos uma solução idêntica - sermos nós a projetar e a construiu o nosso aparelho.

O desafio foi aceite!

Após a análise de diversa literatura, onde aprofundámos conhecimentos relativamente às diversas particularidades que pretendíamos analisar, começámos a projetar o nosso simulador.

Como pretendemos realizar ensaios de campo (no nosso caso referimo-nos a zonas florestais afetadas por incêndios florestais, por vezes de difícil acesso), a portabilidade/mobilidade do equipamento revelou-se a característica basilar que iria nortear o planeamento do projeto. Assim tivemos sempre em consideração o peso do equipamento e as suas dimensões, tentando manter ambos o mais reduzido possíveis.

Objetivos do nosso projeto: construção de um simulador de chuva de baixo custo, de peso reduzido (tendo em vista a sua portabilidade), que pudesse ser desmontado e transportado por duas ou três pessoas e que permitisse ao longo de um ensaio programar o uso de diferentes intensidades de chuva durante determinados intervalos de tempo.

Também tomámos em consideração as suas dimensões (para poder der deslocado na bagageira de um carro), a quantidade de água que necessitaria de utilizar e a facilidade na reposição de peças.

Decidimos que o nosso simulador de chuva seria constituído por três partes facilmente interligáveis (Figura 12):

- Unidade de controle

- Unidade de preparação da água

- Estrutura de suporte e produção da chuva simulada



Figura 12. Projeto

### 3.1 - Unidade de controle

A unidade de controle (Figura 13) é o “cérebro” do nosso simulador de chuva, e que nos permite parametrizar diversas condições e controlar o desenrolar dos ensaios.



Figura 13. Unidade de controle

De forma a controlar o custo total do simulador, fomos criativos nas aquisições dos diversos componentes; optando por simplificar ao máximo toda a construção.

Devido à quantidade de variáveis que é necessário processar em cada ensaio, optámos por utilizar um Arduino Uno R3 (placa composta por um processador ATMEGA328, circuitos de entrada/saída que pode ser facilmente conectada a um computador e programada via IDE (Integrated Development Environment, ou Ambiente de Desenvolvimento Integrado) utilizando uma linguagem baseada em C/C++, sem a necessidade de equipamentos extras além de um cabo USB).

Na figura 14 podemos observar os diversos componentes e ligações que se encontram no interior da unidade de controle.

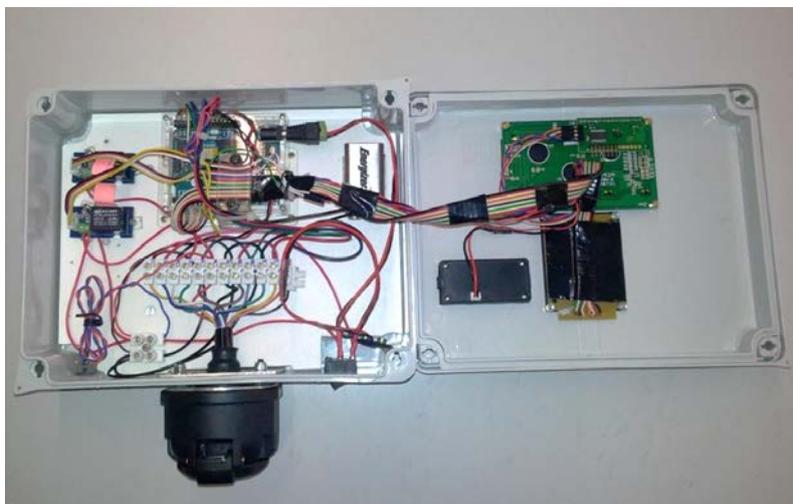


Figura 14. Interior da unidade de controle

A unidade de controle incorpora os seguintes componentes:

- Uma placa Arduino Uno R3 (já referida);
- Dois módulos relé (o relé - ou em inglês relay - é um componente eletromecânico, com o qual se consegue acionar um interruptor a partir de um sinal);
- Um display (LCD05 - com interface série I2C de 20 caracteres x 4 linhas);
- Um segundo display que nos permite avaliar a carga da bateria de 12v (tem um voltímetro incorporado que mede o nível de corrente armazenada);
- Um teclado numérico de 12 teclas (necessário para a introdução das variáveis).
- Uma bateria de 9v como fonte de alimentação (os componentes instalados na unidade de controle funcionam com baixa voltagem) – após alguns testes verificamos que esta bateria oferecia pouca autonomia, e optamos por instalar uma ponte retificadora (filtra 12v para 9v) e assim a unidade de controle passou a ser alimentada pela bateria de 12v 7Ah.

A figura 15 ilustra a forma como os diversos componentes estão conectados à placa Arduino.

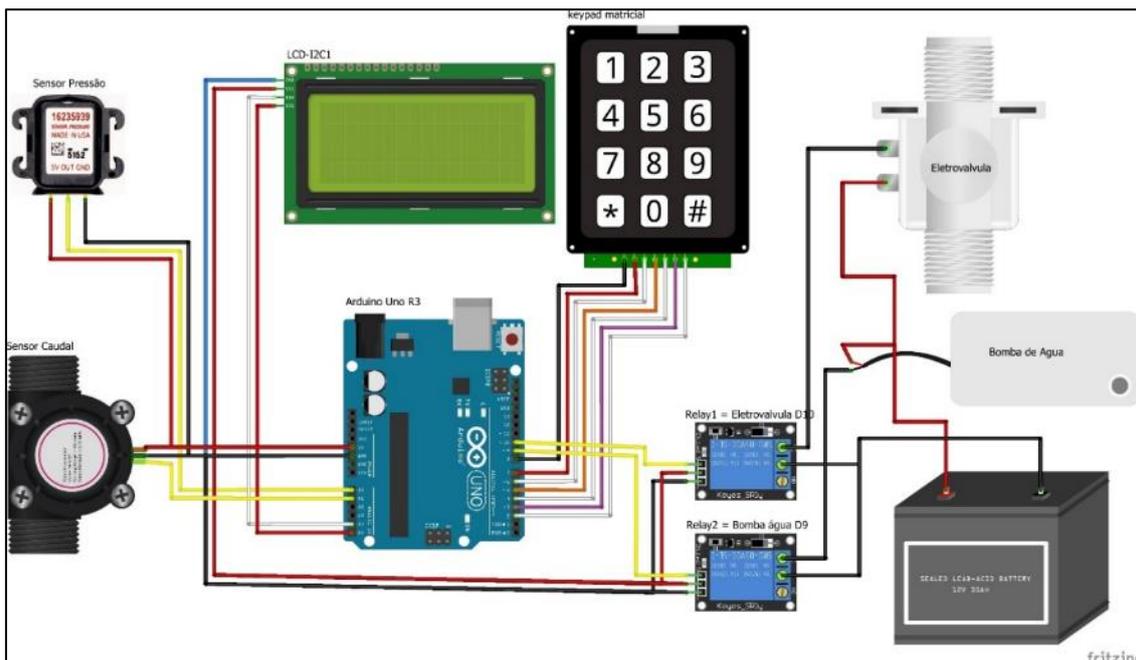


Figura 15. Esquema das ligações

### 3.1.1 - Mas afinal o que é um Arduino?

Arduino é uma plataforma de prototipagem eletrónica, criado por Massimo Banzi e David Cuartielles, em 2005, com o objetivo de permitir o desenvolvimento de controlo de sistemas interativos, de baixo custo e acessível a todos.



(Fonte: Arduino Portugal , 2020)

Figura 16. Placa Arduino Uno

Com o Arduino é possível enviar e receber informações de praticamente qualquer outro sistema eletrónico. Desta forma, é possível contruir, por exemplo, um sistema de captação de dados de sensores, como temperatura, controlo de iluminação, processar e enviar esses dados para um sistema remoto, ou demonstrá-los num ecrã.

Outra característica importante é que todo material (software, bibliotecas, hardware) é open-source, ou seja, pode ser usado por todos, sem a necessidade de pagamento de royalties ou direitos de autor.

A plataforma é composta essencialmente de duas partes: o Hardware e o Software. Trata-se de uma placa PBC de programação de código aberto, baseado numa simples placa microcontroladora e um ambiente de desenvolvimento para escrever o código para a respetiva placa.

A linguagem de programação do Arduino é uma implementação do Wiring, uma plataforma computacional física semelhante, que é baseada no ambiente de programação Processing, feito em Java (Massimo Banzi, 2005).

### 3.1.2 - O Hardware do Arduino

O hardware do Arduino é muito simples e simultaneamente muito eficiente. Todas as placas Arduino têm uma constituição semelhante, e são compostas pelos seguintes blocos:

- Fonte de Alimentação – Recebe energia externa, filtra e converte a entrada em duas tensões reguladas e filtradas (3 e 5v). A alimentação (selecionada automaticamente), pode vir da conexão USB ou do conector para alimentação externa (bateria);
- Núcleo CPU – Um microcomputador com processador ATMEGA328 responsável por dar vida à placa;
- Entradas e Saídas – A placa Arduino possui 14 portas digitais (6 delas podem ser usadas como saídas PWM) assim como 6 portas analógicas;
- Pinos com Funções Especiais – Alguns pinos possuem hardware embutido para funções especiais.
- Firmware – Programa que carregamos dentro da CPU via IDE (Integrated Development Environment, ou Ambiente de Desenvolvimento Integrado) utilizando uma linguagem baseada em C/C++, com as nossas instruções de funcionamento da placa.

Resumidamente, o hardware é uma placa eletrônica que:

- Possui todos os componentes necessários para a maioria dos projetos;
- Contém uma eletrônica que permite usar a placa com diversas fontes de energia, baterias e fontes de alimentação;
- Permite o acoplamento de circuitos externos através de pinos de conexão em posições padronizadas (Shields);
- A eletrônica é baseada em componentes de fácil aquisição, a maioria a preços muito acessíveis;
- O esquema da placa é livre (open source), e pode ser facilmente modificado ou adaptado.
- A placa é programada, ou seja, escrevemos um software que ficará embutido no chip controlador (firmware). A linguagem de programação do Arduino é uma implementação do Wiring, uma plataforma computacional física semelhante, que é baseada no ambiente de programação Processing, feito em Java.

### 3.1.3 - Software

O software fornece as instruções necessárias em linguagem de programação que instrui o microcontrolador a executar as etapas do ensaio, fazendo os cálculos necessários e atuando de acordo com os resultados desses cálculos e os parâmetros do ensaio que foram previamente estabelecidos.

Uma característica que teve grande peso na decisão de optarmos pelo Arduino foi o facto de o software ser open source, ou seja, poder ser usado por todos, sem a necessidade de pagamento de royalties ou direitos de autor, existindo uma infinidade de sites e de fóruns na Internet onde facilmente se pode encontrar diverso software e bibliotecas, assim como muitas vezes obter resposta para as nossas dúvidas junto da comunidade de utilizadores.

Esta etapa representou um desafio considerável pois, aliado aos nossos limitados conhecimentos de programação, tivemos de lidar com os constrangimentos que a placa Arduino apresenta (por exemplo a pouca capacidade de armazenamento (ao programar-se não se pode andar com muitos “rodeios” ou floreados), não ser possível colocar breakpoints, consultar variáveis ou mesmo parar o firmware em tempo real para conferir endereços de memória ou variáveis, entre outros).

Após diversas ponderações, decidimos que o Arduino deveria realizar a rotina que a seguir apresentamos.

### 3.1.3.1 - Rotina inicial / sequência de arranque - Ações automáticas:

I.) Apresentar no visor (Display LCD) a seguinte mensagem - manter até ao ponto II.)

Geografia e Planeamento UMinho  
Simulador de chuva

I. a) Abre relé da electroválvula até o sensor de pressão medir 0 bares

I. b) A seguir deve ligar o relé da bomba de água até pressão - 0,5 bar

II.) Neste momento o sistema já se encontra preparado para dar início ao ensaio. O display deverá informar:

Verificação concluída  
Introduza critérios

II. a) Inserir Pressão (entre 0,5 e 4 bares)

II. b) Inserir Caudal (litros de água)

II. c) Inserir a duração total do ensaio (minutos)

- O relé da bomba de água deverá ligar até o sistema acusar a pressão que se definiu, e depois automaticamente irá manter essa pressão (liga/desliga conforme vai sendo necessário)

- O relé da electroválvula vai abrindo/fechando a passagem de água tendo calculado o número de ciclos (chuva-intervalo-chuva) que deverá realizar em função da duração do ensaio que se definiu e da precipitação pretendida.

### 3.1.3.2 – Programa

Atualmente os computadores estão preparados para procurarem e instalarem automaticamente os drivers (controladores), quando se lhes conecta um componente ou um periférico novo (sistemas operativos mais antigos era necessário instalá-las manualmente).

Mas afinal, para que servem os drivers?

A função de um controlador de dispositivo é fazer com que o mesmo consiga interagir corretamente com o computador. Este controlador é responsável por cuidar dos pedidos que são feitos entre o dispositivo e o computador aceitando diversos requerimentos abstratos do software independente do dispositivo acima dele.

Os controladores não são processos ou programas, são na realidade um conjunto de tabelas que contêm informação sobre cada dispositivo, tal como os fluxos de informação (podemos considerar os controladores de dispositivos um tradutor entre o dispositivo e as aplicações/sistema operativo).

Para programar o Arduino começa-se por instruí-lo de como deve lidar com cada dispositivo que lhe está acoplado (fornecer-lhe as diversas bibliotecas (tabelas com informação) de cada dispositivo). Isto vai habilitá-lo a operar com o display, com o teclado numérico, com os módulos relé, com os dados que lhe chegam do sensor de pressão ou do medidor de caudal.

Depois temos de lhe dizer o que ele deve fazer, e para isso temos de escrever o código (programa).

Escrevemos o código de programação do nosso projeto no programa “Arduino IDE” utilizando uma linguagem baseada em C/C++, com as nossas instruções de funcionamento da placa, e depois enviamos-lo para a nossa placa arduino via porta usb conectada na placa Arduino (nesse momento realiza-se a compilação).

O que é o processo de compilação?

Compilação é o ato/processo de traduzir um programa feito numa linguagem de alto nível para uma linguagem de máquina, para que as suas instruções sejam executadas pelo processador, ou seja, cria o executável de um programa escrito numa linguagem de alto nível para código de máquina.

Após introduzirmos o programa (respeitando a rotina inicial definida), obtivemos a seguinte sequência (Figura 17):

Exemplo da sequência da introdução das variáveis para a realização de um ensaio.



```
Geografia e Planeame  
nto UMinho  
Simulador de Chuva
```

```
Introduza criterios:  
_
```

```
Pressao 1.5-4 bares:  
(default = 1.5)  
_
```

```
Caudal 1+ (Litros):  
_
```

```
Tempo 1+ (minutos):  
_
```

```
Pressao:4.00bar  
Caudal: 8.00L  
Tempo: 4min  
* = CANCELAR, # = OK
```

Figura 17. Sequência do programa

### 3.2 - Unidade de preparação da água

Os simuladores de chuva que utilizam bicos de pulverização (que impulsionam a água a uma determinada velocidade), carecem de um equipamento que garanta o fornecimento de água a uma pressão constante, pré-determinada.

Na demanda da portabilidade, conseguimos que a unidade de preparação da água atingisse um peso final de 30,5kg e umas dimensões reduzidas: 60cm x 40cm x 36cm.

Na figura 18 podemos observar um esquema da unidade de preparação da água, onde constam os diversos componentes e a sequência com que estão ligados.

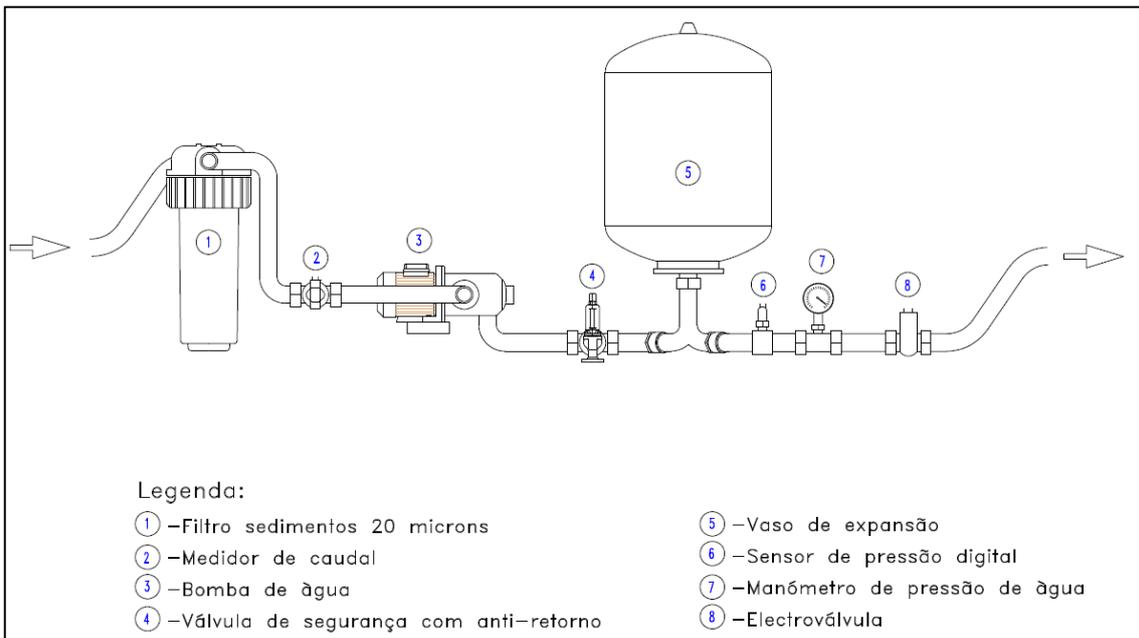


Figura 18. Esquema de montagem da unidade de preparação da água

Um dos componentes essenciais é a bomba de água, que vai gerar água pressurizada; no entanto também foi necessário instalar um vaso de expansão para absorver variações de pressão, mantendo o circuito estabilizado a uma determinada pressão.

No campo nem sempre se tem acesso a água sem detritos, assim instalamos um filtro de sedimentos 20 microns de forma a proteger o sistema.

Adicionamos um medidor de caudal digital que irá contabilizar o consumo de água, um sensor de pressão digital e uma electroválvula responsável por abrir e fechar a passagem de água.

Como medida de segurança redundante, instalámos também uma válvula de segurança mecânica (descarrega aos 6 bares), e um manómetro analógico.

Como fonte de alimentação, que irá fornecer energia elétrica a todos os componentes eletrônicos (incluindo à unidade de controle), optamos por uma bateria de 12v 7Ah.

Na figura 19 observam-se os componentes que iremos utilizar.



Figura 19. Diversos componentes que usamos no projeto

A seguir podemos observar a unidade de preparação da água já montada (Figura 20).



Figura 20. Unidade de preparação da água

### 3.3 - Estrutura de suporte e produção da chuva simulada

Concebemos uma estrutura com 2m de altura, estilo tripé em alumínio (Figura 21) onde será montado o bico de pulverização. A distância de 2m foi aferida após diversos ensaios, onde pretendíamos que os impactes das gotas no chão formassem um círculo com 60cm de diâmetro.

As pernas são do tipo telescópico para permitirem um fácil nivelamento da parte superior em zonas de declive, e também facilitarem o seu transporte.

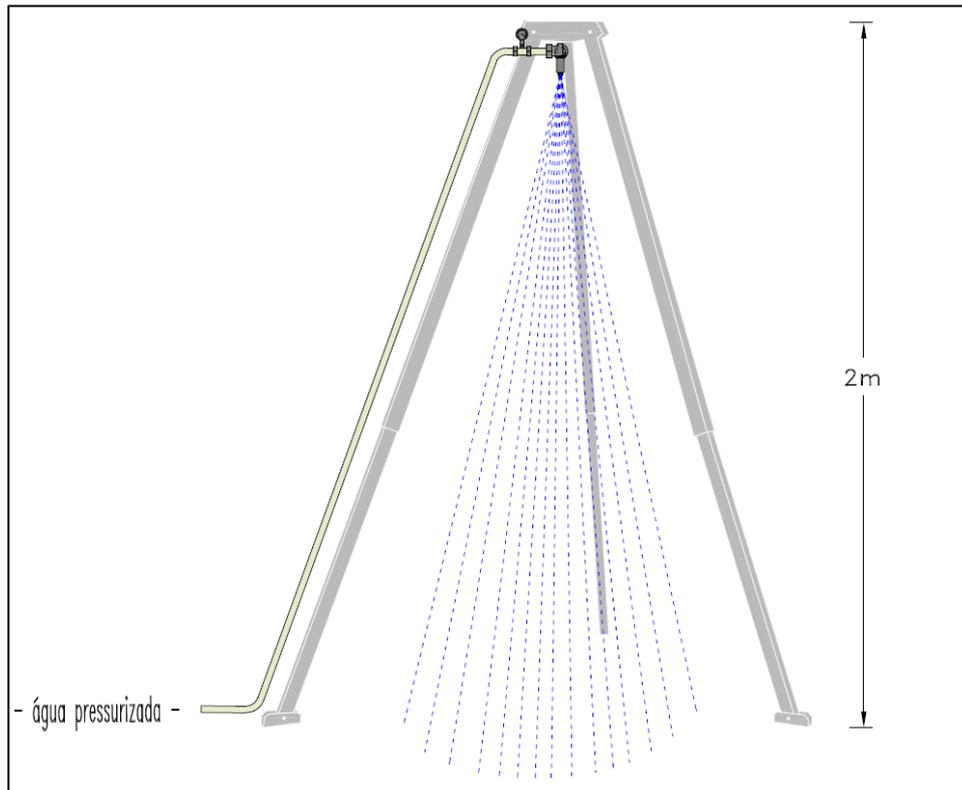


Figura 21. Estrutura de suporte

Para evitar a dispersão das gotas pela ação do vento, está prevista uma “saia” quebra vento em lona de rafia, a rodear o tripé pelo exterior.

A escolha do bico de pulverização mereceu um exame minucioso. Há diversos modelos disponíveis no mercado, atendendo diversos fins; como uso agrícola, industrial ou de segurança. Mas não existem bicos específicos para simulação de chuvas.

O bico de pulverização necessita de água à pressão para produzir aspensão; e de acordo com a mudança da pressão, são produzidas variadas intensidades de chuveiros.

Na escolha do bico aspersor tivemos em atenção diversos fatores como: padrão de pulverização; distribuição uniforme numa grande variedade de taxas de caudais e

pressões; gotas de tamanho médio a grande (similares ao tamanho das gotas provenientes de chuva natural), e raio de ação.

### 3.4 - Testes

Para se validar o correto funcionamento do simulador de chuva, realizaram-se chuvas simuladas atestando-se diversos parâmetros.

Começamos por determinar a quantidade de água de uma gota que o bico de aspersão produz. Após diversas medições, concluiu-se que em média cada gota continha 0.495mg/ml de água.

A seguir resolvemos aferir a precisão de replicação que o equipamento permite. Para isso configurou-se o simulador a 1 bar de pressão e realizaram-se diversos ensaios com a duração de 1000 milissegundos. Na tabela 1 podem-se observar os valores obtidos.

Tabela 1. Ensaios a 1 bar de pressão com a duração de 1000 milissegundos

<b>Ensaio</b>	<b>Tempo (milissegundos)</b>	<b>init_bar</b>	<b>end_bar</b>	<b>water_weight_ml</b>
1	1000	1,04	0,45	8,79
1	1000	1,04	0,50	7,68
2	1000	1,01	0,45	8,41
2	1000	1,01	0,45	8,51
2	1000	1,01	0,48	7,86
3	1000	1,01	0,45	8,48
3	1000	1,01	0,47	7,75
5	1000	1,01	0,47	7,61
6	1000	1,01	0,48	7,78
7	1000	1,01	0,45	7,63
8	1000	1,01	0,45	7,97
9	1001	1,01	0,47	7,98

A média de quantidade de água pulverizada foi de 8,0375ml; mas para percebermos melhor o grau de dispersão dos valores em relação ao valor médio dos números, calculamos o desvio padrão.

O valor obtido de 0,4032ml é o equivalente a uma gota (0,495 mg/ml de água), pelo que o desvio observado é aceitável (representava em cada medição umas gotas de diferença).

A seguir explicamos o raciocínio das equações e demais considerandos.

### Determinar a equação do caudal do aspersor

Para se determinar o caudal que o simulador produz, definimos um intervalo de tempo fixo (10 segundos), e executamos pulverizações a diferentes pressões, desde 1.5 até 3 bar (Tabela 2).

Tabela 2. Quantidade de água pulverizada durante 10 segundos a diferentes pressões

Pressão (Bar)	mg/ml por 10 seg
1.5	168.4
1,75	181.91
2	190
2.25	200.43
2.5	211
2,75	226.27 / 223.62
3	233.59

Para aproximar os pontos empregando uma equação, decidimos usar uma reta porque parecia haver uma variação mais ou menos constante por volta dos 10ml.

Então, com o programa informático Matlab, fez-se a aproximação a um polinómio de grau 1=uma reta. Polinómio de grau N significa que o maior grau exponencial da variável é N:

ex:  $2x+3$  ← grau 1 (reta);  $x^2-9$  ← grau 2 (parábola);  $4x^3 + 4x$  ← grau 3)

Comandos MATLAB para determinar a equação pressão - caudal de 10 segundos em ml:

»  $x = (1.5:0.25:3)$ ; % equivalente a [1.5 1.75 2 2.25 2.5 2.75 3]

»  $y = [168.4 181.91 190 200.43 211 226.27 233.59]$ ;

»  $eq = \text{polyfit}(x,y,1)$ ;

»  $eq = 43.6129 + 103.5282$

O Matlab calcula os coeficientes da equação, com os graus da esquerda para a direita, que implicitamente é:

(...  $0x^4 + 0x^3 + 0x^2 +$  )  $43.6129x + 103.5282$

Então: caudal =  $43.6129$  pressão +  $103.5282$  (ml/10 seg)

ex:  $43.6129 * 2 \text{ bar} + 103.5282 = 190.754 \text{ml}/10 \text{seg}$  (muito próximo do valor verdadeiro medido de  $190 \text{ml}/10 \text{seg}$ )

### Calcular tempo do sistema “aberto”:

A equação do caudal do aspersor dá a quantidade de água que sai durante 10 segundos a uma dada pressão. Ora, as simulações não vão ser sempre em blocos de 10 segundos, por isso é preciso converter para uma unidade que nos permita ter maior resolução, por exemplo, milissegundos.

Se em 10000 milissegundos sai 43.6129 pressão + 103.5282 ml (10000 por ser 10 \* 1000, 10 segundos das medições \* 1000 milissegundos de conversão), então quantos milissegundos são necessários para despejar um caudal C litros? (igual a 1000\*C ml)

$$10000 \text{ (tempo em ms)} \rightarrow 43.6129 \text{ pressão} + 103.5282 \text{ (caudal em ml)}$$

$$\text{total\_ms\_aberto (tempo em ms)} \rightarrow 1000 * C \text{ (caudal em ml)}$$

$$\Leftrightarrow \text{total\_ms\_aberto} = 1000 * C * 10000 / 43.6129 \text{ pressão} + 103.5282$$

Este total\_ms\_aberto é a quantidade de tempo necessária para que a determinada pressão, espalhe C litros de água.

### Calcular conversão:

A precipitação é medida em litros por metro quadrado (l/m<sup>2</sup>). Mas o nosso simulador projeta a água na forma de um cone, atingindo o solo numa área circular de 60cm de diâmetro.

Assim foi necessário calcular a quantidade de água correspondente a essa área.

$$\text{Área de uma circunferência de raio } r = \pi * r^2 \Leftrightarrow \pi * 30\text{cm} * 30\text{cm}$$

Então, por regra de proporcionalidade direta (3 simples):

$$\text{caudal\_1M quadrado} \rightarrow 10000 \text{ cm}^2 \text{ de área}$$

$$\text{caudal\_convertido} \rightarrow \pi * 30 * 30 \text{ cm}^2 \text{ de área}$$

$$\Leftrightarrow \text{caudal\_convertido} \rightarrow (\pi * 30 * 30 * \text{caudal\_1M quadrado}) / 10000$$

Se usarmos este caudal no cálculo do total\_ms\_aberto, temos o tempo adequado para a área de ensaio de 60cm de diâmetro.

### Calcular delta:

O valor de total\_ms\_aberto representa o tempo total (em milissegundos) em que electroválvula se encontrará na posição aberta.

Como não faz sentido despejar a água toda de uma só vez, e ficar o resto do tempo do ensaio à espera (muito diferente do que ocorre na natureza), vamos tentar distribuir de

forma mais equilibrada os períodos de aspersão ao longo do tempo de ensaio (abrindo e fechando a electroválvula em intervalos regulares).

Neste sentido, como se introduz a duração em minutos, vamos dividir os intervalos em blocos de 1min, com a chuva a ocorrer no início dos intervalos.

Então, em cada minuto, o tempo de chuva deve ser  $\text{total\_ms\_aberto}/\text{minutos}$ .

Daqui resulta a função (nota: raio=30cm):

```
unsigned int calcularDelta(double pressão, double caudal, int minutos){
/* Calculo do intervalo de tempo em que a electroválvula deve estar aberta
* por forma a deitar toda a água de forma distribuída pelo tempo do ensaio
* Recebe a pressão, o caudal e o tempo de ensaio que o user pretende
* Retorna milissegundos a abrir por cada minuto
* Se o total_ms_aberto for calculado com caudal, deita água como se fosse num
metro quadrado
* Se o total_ms_aberto for calculado com caudal_convertido, deita água como se
fosse na área de ensaio (30cm de raio)
*/
double caudal_convertido = converterArea (RAIO)*caudal/10000; //simples
conversão por regra de três simples, quantos L devem sair se for ensaio num círculo
unsigned int total_ms_aberto r = (1000*caudal*10000)/(43.6129*pressão +
103.5282); //tempo total, em milissegundos, de chuva durante o ensaio
return total_ms_aberto/minutos;//tempo de chuva por cada minuto
}
double converterArea(int RAIO){
/* Calculo rápido da área de um círculo de raio = RAIO cm
* Retorna a área em centímetros quadrados
*/
return (double)3.14159 * RAIO * RAIO;
}
```

A consistência dos resultados obtidos (além dos testes mencionados, realizaram-se outros para comprovar o grau de precisão) revelaram a capacidade deste simulador em replicar situações, demonstrando assim o seu valor científico.

## **Conclusão**

Todos os anos o território português é assolado por inúmeros incêndios florestais, resultando em extensas perdas de vidas humanas e bens materiais.

Os solos ficam sujeitos a processos erosivos de grande intensidade; sendo extremamente difícil determinar a amplitude das consequências, pois estas revestem-se de uma complexidade notável devido às múltiplas variáveis envolvidas e à forma como essas variáveis se encontram inter-relacionadas.

Neste sentido, revela-se de extrema importância o desenvolvimento de investigação aplicada no âmbito da Geografia, através da aplicação de metodologias de avaliação dos processos geomorfológicos que se observam, de forma particularmente gravosa, nas áreas afetadas por incêndios florestais.

Os resultados deste tipo de investigação é fundamental para um conhecimento aprofundado dos processos erosivos na sequência de incêndios florestais, permitindo, à posteriori, a definição de medidas que permitam sua mitigação, com o objetivo de conservação dos solos.

Assim, o desenvolvimento e aplicação destas metodologias de análise e monitorização de processos torna-se de capital importância no âmbito das ações de gestão do território. Elas permitem estudar e simular contextos para se perceber melhor as dinâmicas envolvidas.

Com esse intuito, decidimos construir um simulador de chuva de baixo custo, que fosse passível de ser transportado para zonas áridas e aí permitir a realização de diversos ensaios.

Assim, desenvolvemos o simulador proposto que inclui uma unidade mecânica que permite projetar a água, e uma componente eletrónica de gestão que inclui uma placa Arduino Uno com a capacidade de ser programada.

Tratando-se de um projeto personalizado (construído a pensar em satisfazer determinados critérios), não possuíamos um manual por onde nos orientarmos.

Consequentemente, no decorrer da realização deste trabalho fomos adquirindo conhecimentos, por vezes pelo método da tentativa e erro.

Exemplo disso foi a aquisição de componentes que posteriormente verificamos não serem os mais adequados às nossas necessidades. Também durante a realização dos testes, constatámos que a fonte de alimentação instalada (bateria de 12 volts e 7 amperes) tinha uma autonomia reduzida (recordo que ela é responsável por fornecer energia elétrica

a todos os componentes eletrônicos do nosso projeto), sendo que uma carga dava apenas para cerca uma hora de ensaios.

Temos noção que eventualmente haverá a necessidade de se aperfeiçoar/alterar alguns parâmetros ou componentes – conforme se for utilizando o simulador em diferentes ensaios, essas carências tornar-se-ão evidentes.

No entanto, estamos confiantes de que este equipamento possui a versatilidade necessária para se adaptar a diversas solicitações, e que constituirá uma mais valia de apoio a futuros trabalhos de campo.

Consideramos, portanto, que este equipamento e a metodologia de implementação e análise inerente à sua utilização será de extrema utilidade na avaliação da erosão de solos em diferentes ambientes, particularmente em áreas afetadas por incêndios florestais, auxiliando, também, na testagem de medidas de mitigação daqueles processos, com aplicações diretas na definição de estratégias de gestão de territórios afetados por estes problemas ambientais.

## Referências bibliográficas

- Abudi, I., Carmi, G., & Berliner, P. (2012). "Rainfall simulator for field runoff studies". *Journal of Hydrology*, 454, p.76–81.
- Adams, E., Kirkham, D., & Nielsen, R. (1957). "A portable rainfall-simulator infiltrometer and physical measurements of soil in place". *Soil Science Society of America Journal*, 21 (5), p. 473 - 477.
- Arduino Portugal - Comunidade de Arduino em Portugal. (2020). <https://www.arduinoportugal.pt/>
- Arnáez, J., Malhat, F., Jaikaew, P., Nanko, K., & Watanabe, H. (2019). "Portable rainfall simulator for plot-scale investigation of rainfall-runoff, and transport of sediment and pollutants". *International Journal of Sediment Research*, (34), p. 38 - 47.
- Asensio, S. I., Ramón, H. m., & Blanquer, J. M. (2012). "El uso de un simulador de lluvia". Escuela Técnica Superior de Ingeniería Agronómica y del Medio Natural. Universitat Politecnica de Valencia.
- Bárcenas-Moreno, G., & Díaz-Raviña, M. (2013). "Efectos del fuego sobre los microorganismos del suelo". *Red Temática Nacional Efectos de los Incendios Florestales sobre los Suelos (FUEGORED)*, 5.
- Barros, A. P., Prat, O. P., Shrestha, P., Testik, F. Y., & Bliven, L. F. (2008). "Revisiting Low and List (1982): Evaluation of raindrop collision parameterizations using laboratory observations and modeling". *Journal of the Atmospheric Sciences*, 65(9), p. 2983–2993.
- Batista, C., Reissmann, C. B., & Soares, R. V. (1997). "Efeitos da queima controlada sobre algumas propriedades químicas do solo em um povoamento de *Pinus taeda* no município de Sengés—PR".

- Benito, E., Blas, E., Santiago, J. L., & Varela, M. E. (2001). "*Descripción y puesta a punto de un simulador de lluvia de campo para estudios de escorrentía superficial y erosión del suelo*". *Cadernos do Laboratorio Xeolóxico de Laxe*, 2001, (26), p 211-220
- Bento-Gonçalves, A. (2007). *Geografia dos incêndios em espaços silvestres de montanha: O caso da Serra da Cabreira*. <http://repositorium.sdum.uminho.pt/>
- Bento-Gonçalves, A. (2021). *Os Incêndios florestais em Portugal*. Fundação Francisco Manuel dos Santos
- Bento-Gonçalves, A., Vieira, António, Martins, C. O., Ferreira-Leite, F., Costa, F. (2010). "*A desestruturação do mundo rural e o uso do fogo - o caso da Serra da Cabreira (Vieira do Minho)*". In M. Martins (Ed.), *Caminhos nas Ciências Sociais – memória, mudança social e razão. Estudos em homenagem a Manuel da Silva Costa*. Braga: ICS - UMinho, p 87-104.
- Bento-Gonçalves, A., Vieira, A., Úbeda, X., & Martin, D. (2012). "*Fire and soils: Key concepts and recent advances*". *Geoderma*, Elsevier, Vol.191, p. 3 - 13.
- Bowyer-Bower, T. A. S., & Burt, T. P. (1989). "*Rainfall simulators for investigating soil response to rainfall*". *Soil Technology*, 2(1), p. 1–16.
- Brakensiek, D. L., Rawls, W. J., & Hamon, W. R. (1979). "*Application of an infiltrometer system for describing infiltration into soils*". *Transactions of the ASAE*, 22(2), p. 320–325.
- Bubenzer, G. D., & Jones, B. A. (1971). "*Drop size and impact velocity effects on the detachment of soils under simulated rainfall*". *Transactions of the ASAE*, 14(4), p. 625–628.

- Bubenzer, G. D., Molnau, M., & McCool, D. K. (1979). "*Palouse rainfall simulator [Great Basin and Pacific Slope States, USA]*". Agricultural Reviews and Manuals ARM W.
- Castro, C. F., Serra, G., Parola, J., Reis, J., Lourenço, L., & Correia, S. (2003). "*Combate a incêndios florestais*". Escola Nacional de Bombeiros, p. 13.
- Cerdà, A. (1999). "*Simuladores de lluvia y su aplicación a la Geomorfología*". Estado de La Cuestión. Department de Geografica. Universitat de Valencia, Spain: Centro de Investigaciones Sobre Desertificación\_CIDE (CSIC-Universitat de València-Generalitat Valenciana).
- Cerdà, A., Porras, E. M., López, J. L., Rueda, E. B., Cabello, F. P., Úbeda, X., López, A., Zavala, L. M., & Sinoga, R. (2010). "*La lluvia simulada como herramienta para la investigación del efecto de los incendios forestales sobre los suelos*". Actualización En Métodos y Técnicas Para El Estudio de Los Suelos Afectados Por Incendios Forestales, p. 43–83.
- Cohen, S., & Asseline, J. (1999). "*Uso de lluvia artificial para parametrizar modelos de procesos hidrológicos*". SAGAR - INIFAP.
- Costa, A. M. (1995). "*Evolução dos fogos florestais e áreas ardidias. Análise da época de fogos de 1995*". Actas V EPRIF - Encontro Pedagógico Sobre Risco de Incêndio Florestal, p. 29–33.
- Donald, M. L. (1988). "*Rainfall simulators for soil conservation research*". Lal R (Ed.). Soil Erosion Research Methods. Soil and Water Conservation Society, Ankeny, IA, p. 75–96.
- Epema, G. F., & Riezebos, H. (1983). "*Fall velocity of waterdrops at different heights as a factor influencing erosivity of simulated rain*". Catena. Supplement (Giessen), (4), p. 1–18.

- Fufa, S. D., Strauss, P., & Schneider, W. (2002). "*Comparison of erodibility of some hararghe soils using rainfall simulation*". *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 33 (3–4), p. 333–348.
- Giovannini, G. (1987). "*Effect of fire and associate heating wave on the physicochemical parameters related to the soil potential erodibility*". *Ecologia Mediterranea*, 13(4), p. 111–117.
- Giovannini, G. (1994). "*The effect of fire on soil quality. Soil Erosion and Degradation as a Consequence of Forest Fires*". Eds M. Sala, JL Rubio. p. 15–27.
- Hignett, C. T., Gusli, S., Cass, A., & Besz, W. (1995). "*An automated laboratory rainfall simulation system with controlled rainfall intensity, raindrop energy and soil drainage*". *Soil Technology*, 8(1), p. 31–42.
- Horton, R. E. (1939). "*Analysis of runoff-plat experiments with varying infiltration-capacity*". *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 20(4), p.693–711.
- Imeson, A. C., Kwaad, F. M., & Verstraten, J. M. (1982). "*The relationship of soil physical and chemical properties to the development of badlands in Morocco*". *Badland Geomorphology And Piping; Gbr; Norwich: Geo Abstracts; Da. 1982; p. 47-70.*
- Iserloh, T., Fister, W., Seeger, M., Willger, H., & Ries, J. B. (2012). "*A small portable rainfall simulator for reproducible experiments on soil erosion*". *Soil and Tillage Research*, (124), p. 131–137.
- Iserloh, T., Ries, J. B., Arnáez, J., Boix-Fayos, C., Butzen, V., Cerdà, A., Echeverría, M. T., Fernández-Gálvez, J., Fister, W., Geißler, C., Gómez, J. A., Gómez-Macpherson, H., Kuhn, N. J., Lázaro, R., León, F. J., Martínez-Mena, M., Martínez-Murillo, J. F., Marzen, M., Mingorance, M. D., ... Wirtz, S. (2013).

- "European small portable rainfall simulators: A comparison of rainfall characteristics"*. CATENA (110), p. 100–112.
- Kleijn, W. B., Oster, J. D., & Cook, N. (1979). *"A rainfall simulator with nonrepetitious movement of drop outlets"*. Soil Science Society of America Journal, 43(6), p. 1248–1251.
- Laws, J. O. (1941). *"Measurements of the fall-velocity of water-drops and raindrops"*. Eos, Transactions American Geophysical Union, 22(3), p. 709–721.
- Laws, J. O., & Parsons, D. A. (1943). *"The relation of raindrop-size to intensity"*. Eos, Transactions American Geophysical Union, 24(2), p. 452–460.
- Le Bissonnais, Y., Cerdan, O., Lecomte, V., Benkhadra, H., Souchère, V., & Martin, P. (2005). *"Variability of soil surface characteristics influencing runoff and interrill erosion"*. Catena, 62(2–3), p. 111–124.
- Lima, E. (2016). *"Comparação da eficácia de tecnologias para o controlo da perda de solo em áreas aridas no Nordeste de Portugal aplicando modelo de erosão"*. Instituto Politécnico de Bragança - IPB.
- Lourenço, L. (1995). *Intervenção do Responsável pelo Prosepe, Presidente da Comissão Executiva do V EPRIF. Actas V EPRIF - Encontro Pedagógico Sobre Risco de Incêndio Florestal*, p. 12–15.
- Lourenço, L., Mota, L., Paúl, J., Correia, S., Parola, J., & Reis, J. (2006). *"Manual de Combate a Incêndios Florestais para Equipas de Primeira Intervenção"*. ENB - Escola Nacional de Bombeiros, p. 2.51.
- Lourenço, L., Bento-Gonçalves, A., & Monteiro, A. (1991). *"Avaliação da erosão dos solos produzida na sequência de incêndios florestais"*. In *Comunicações, II Congresso Florestal Nacional, Porto, Vol. II*, p. 834–844.

- Lourenço, L., Bento-Gonçalves, A., Vieira, A., Nunes, A., Ferreira-Leite, F., (2012). *"Forest Fires in Portugal"*. In Bento Gonçalves & Antonio Vieira (Eds.), Portugal: Economic, Political and Social Issues, Hauppauge New York: Nova: Nova Science Publishers, p. 97-111.
- Lourenço, L., Fernandes, S., Bento-Gonçalves, A., Castro, A., Nunes, A., & Vieira, A. (2012). *"Causas de incêndios florestais em Portugal continental. Análise estatística da investigação efetuada no último quinquénio (1996 a 2010)"*. *Cadernos de Geografia*, 30–31, 61–80.
- Lourenço, L., & Malta, P. (1993). *"Incêndios florestais em Portugal Continental na década de 80 e nos anos seguintes"*. *Finisterra*, (28), p. 55-56.
- Macedo, F. W., & Sardinha, A. S. (1993). *"Fogos Florestais"*. Publicações Ciência e Vida, Lisboa, 1º Vol (2ª Edição) Livraria Escolar Editora, 430 pp.).
- Martínez-Zavala, L., & Jordán, A. (2008). *"Effect of rock fragment cover on interrill soil erosion from bare soils in Western Andalusia, Spain"*. *Soil Use and Management*, 24(1), p. 108–117.
- Massimo Banzi. (2005). *"O que é Arduino?"* <https://www.arduinoportugal.pt/o-que-e-arduino/>
- Mataix-Solera, J., Cerdà, A., Arcenegui, V., Jordán, A., & Zavala, L. M. (2011). *"Fire effects on soil aggregation: A review"*. *Earth-Science Reviews*, (109), p. 44 - 60.
- Meyer, L. D. (1994). *"Rainfall simulators for soil erosion research"*. *Soil Erosion Research Methods*, (3), p. 83–103.
- Meyer, L. D., & McCune, D. L. (1958). *"Rainfall simulator for runoff plots"*. *Agricultural Engineering*, 39(10), p. 644–648.
- Morin, J., Goldberg, D., & Seginer, I. (1967). *"A rainfall simulator with a rotating disk"*. *Transactions of the ASAE*, 10(1), p. 74–77.

- Mutchler, C. K., & Hermsmeier, L. F. (1965). "A review of rainfall simulators". Transactions of the ASAE, 8(1), p. 67–68.
- Navas, A., Alberto, F., Machín, J., & Galán, A. (1990). "Design and operation of a rainfall simulator for field studies of runoff and soil erosion". Soil Technology, 3(4), p. 385–397.
- N Neary, D.G., Leonard, J., (2015). "Wildland Fire: Impacts on Forest, Woodland, and Grassland Ecological Processes". In A. Bento-Gonçalves e A. Vieira (Eds.) Wildland fires: a Worldwide reality, Nova Science Publishers, p. 35 - 112.
- Neary, G., Klopatek, C., DeBano, F., & Ffolliott, P. (1999). "Fire effects on belowground sustainability: A review and synthesis". Forest Ecology and Management, (122), p. 51 - 71.
- Neibling, W. H., Foster, G. R., Nattermann, R. A., & Nowlin, J. D. (1981). "Laboratory and field testing of a programmable plot-sized rainfall simulator". Erosion and sediment transport measurement, Proc. Florence Symp. IAHS Publ. 133, p. 405–414.
- Pereira, J. S., Pereira, J. M. C., Rego, F. C., Silva, J., Silva, T. (2006). "Incêndios Florestais em Portugal: Caracterização, Impactes e Prevenção". ISAPress, Lisboa.
- Poesen, J. (1984). "The influence of slope angle on infiltration rate and Hortonian overland flow". Zeitschrift Für Geomorphologie, Supplement Band, (49), p. 117–131.
- Rodrigues, C. M., Guimarães, R. C., & Moreira, M. (1986). "Apontamentos para as aulas de Hidrologia". Universidade de Évora - Departamento de Engenharia Rural, 143.

- Rodríguez, P. J. C. (2015). "*Diseño y montaje de un simulador de lluvia para ensayos de campo: ARLOAN*". Trabajo de Fin de Carrera - Ingeniería Técnica Agrícola, Sevilla.
- Seeger, M. (2007). "*Uncertainty of factors determining runoff and erosion processes as quantified by rainfall simulations*". *Catena*, 71(1), p. 56–67.
- Shakesby, R.A., (2011). "*Post-wildfire soil erosion in the Mediterranean: Review and future research directions*". *Earth-Science Reviews* (105), p. 71–100.
- Soares, L. (2008). "*A importância das formações superficiais no âmbito dos processos de erosão hídrica e movimentos de vertente no NW de Portugal*". Edição de Autor.
- Spilhaus, A. F. (1948). "*Drop size, intensity, and radar echo of rain*". *Journal of Meteorology*, 5(4), p.161–164.
- Vieira, A. (2009). "*Serra de Montemuro: Dinâmicas geomorfológicas, evolução da paisagem e património natural*" PhD Thesis - Repositorium Uminho, p. 231.
- Vieira, António, Bento-Gonçalves, A. (2021). "*Soil Degradation and Conservation: A General Overview*". In A. Vieira e A. Bento-Gonçalves (Eds.) *Soil Conservation: strategies, management and challenges*, Nova Science Publishers, p. 1-30.
- Vieira, A., Bento-Gonçalves, A., Martins, C. O., Ferreira-Leite, F., & Loureiro, E. (2011). "*Implementação de um Sistema Integrado de Informação de apoio à avaliação geomorfológica de áreas críticas à erosão dos solos após incêndios florestais*". GEO-Working Papers.
- Vieira, A., & Costa, F. (2015). *II Simpósio de pesquisa em Geografia*.
- Wildhaber, Y. S., Bänninger, D., Burri, K., & Alewell, C. (2012). "*Evaluation and application of a portable rainfall simulator on subalpine grassland*". *Catena*, (91), p. 56–62.

Wischmeier, W. H., & Smith, D. D. (1978). "*Predicting Rainfall Erosion Losses: A Guide to Conservation Planning*." Department of Agriculture, Science and Education Administration.

## Apêndices

### Programa compilado:

```
#include <Wire.h>
#include <LCD03.h>
#include <Keypad.h>
#include <stdlib.h>
// put your setup code here, to run once - void setup:

// code from Keypad:
const byte ROWS = 4;
const byte COLS = 3;
char keys[ROWS][COLS] =
{
  {'1','2','3'},
  {'4','5','6'},
  {'7','8','9'},
  {'*','0','#'}
};

byte rowPins[ROWS] = {5, 6, 7, 8};
byte colPins[COLS] = {2, 3, 4};
char panel [4*20], key;
String input;
const int RAIO = 30;
int tempo, sensorCaudal, sensorBomba, sensorValvula, BOMBA =10, VALVULA=9, delta = 0, ciclo=0;
unsigned int timeBomba, timeValvula, timeCiclo, timeInit, deltaBomba, deltaValvula, deltaCiclo,
deltaInit;
double pressao, sensorPressao, caudal, sensor=-99;
bool stateBomba = false, stateValvula = false;

Keypad keypad = Keypad( makeKeymap(keys), rowPins, colPins, ROWS, COLS );
LCD03 lcd;

void setup(){

  /* AQUI */
  lcd.begin(20,4);
  lcd.backlight();
  lcd.print("Geografia e Planeamento UMinho");lcd.newLine();lcd.print("Simulador de Chuva");
  delay(1000);
  inicio: Serial.begin(9600); //desbloquear keypad
  pinMode(BOMBA,OUTPUT);
  pinMode(VALVULA,OUTPUT);
  //digitalWrite(RESET,HIGH);
  //pinMode(RESET,OUTPUT);
  //#####

  lcd.clear();lcd.setCursor(0,0);
  lcd.print("Introduza criterios:");
  delay(1000);

  while(true){
    pressao = 1.5; caudal = 1.0; tempo = 1;
    /*
    * 2.2 - Inserir pressão, caudal, duração
    * 2.2.1 - Pressão da bomba de água, [1.5,4] bares
    */
  }
}
```

```

*/
lcd.clear();lcd.home();
lcd.print("Pressao 1.5-4 bares");lcd.setCursor(0,1);lcd.print("(default = 1.5)");
lcd.setCursor(0,3);lcd.cursor();
input = inputReader(true); //receber um número
if(input.toDouble()!=0.0){
    pressao = input.toDouble(); //converter de string para double
    pressao = validarDouble(1.0,4.0,pressao); //garantir que o valor fica dentro da gama (min, MAX,
&valor)
}

/*
* 2.2.2 - Caudal de água (Litros)
*/
lcd.clear();lcd.home();
lcd.println("Caudal 1+ (Litros):");
lcd.setCursor(0,3);
input = inputReader(false);
caudal = input.toInt();
if(caudal<1) caudal =1;

/*
* 2.2.3 - Tempo de duração do ensaio (minutos)
*/
lcd.clear();lcd.home();
lcd.print("Tempo 1+ (minutos):");
lcd.setCursor(0,3);
input = inputReader(false);
tempo = input.toInt();
if(tempo<=0) tempo=1;

/*
* Confirmação dos parâmetros recebidos
*/
lcd.noCursor();lcd.clear();
lcd.print("Pressao:");lcd.print(pressao);lcd.print("bar");lcd.newLine();
lcd.print("Caudal: ");lcd.print(caudal);lcd.print("L");lcd.newLine();
lcd.print("Tempo: ");lcd.print(tempo);lcd.print("min");lcd.newLine();
lcd.print("* = CANCELAR, # = OK");

key = keypad.waitForKey();
if(key=='*'){
    goto inicio;
}
if(key=='#'){
    lcd.clear();
    lcd.setCursor(0,0);
    //fazer validação de parametros
    lcd.println("A preparar programa");
    delta=calcularDelta(pressao,caudal,tempo);
    Serial.print("CAUDAL=");Serial.println(caudal);
    Serial.print("DELTA=");Serial.println(delta);
    sensor=readPressao(true);
    if(sensor-pressao>0.1){
        lcd.clear();lcd.setCursor(0,0);
        lcd.print("Pressao em Excesso");lcd.newLine();lcd.print("Esvazie Manualmente");
        while(sensor>pressao){
            sensor=readPressao(true);
            delay(1000); //por segurança
        }
    }
}

```

```

    }
    lcd.clear();lcd.setCursor(0,0);
    lcd.print("Pronto");
    lcd.setCursor(0,3);lcd.print("*=RESET #=INICIAR");
    while(true){
        key=keypad.waitForKey();
        if(key=='#')break;
        if(key=='*')goto inicio;
    }
    sensor=readPressao(true);
    if(sensor<pressao){
        digitalWrite(BOMBA,HIGH);
        unsigned int clock_aux = millis();
        while(sensor<pressao){
            if(millis()-clock_aux>500){
                lcd.setCursor(0,2);lcd.print("Pressao: ");lcd.print(sensor);lcd.print("bar");
                clock_aux=millis();
            }
            sensor=readPressao(true);
        }
        digitalWrite(BOMBA,LOW);
    }
    //loop();
    break;
}
}
}

void loop(){
    ciclo+=1;
    Serial.print("Novo ciclo: ");Serial.println(ciclo);
    lcd.clear();lcd.setCursor(0,0);
    lcd.print("Min ");lcd.print(ciclo);lcd.print("/");lcd.print(tempo);
    if(ciclo==1) timeInit=millis();
    timeValvula = millis();
    timeBomba = millis();
    timeCiclo = millis();
    digitalWrite(VALVULA,HIGH);
    Serial.println("VALVULA ABERTA");
    while(true){
        deltaCiclo = millis()-timeCiclo;
        deltaValvula = millis()-timeValvula;
        deltaBomba = millis()-timeBomba;
        sensorPressao=readPressao(false);
        if((pressao-sensorPressao)>0.01) digitalWrite(BOMBA,HIGH);
        if((sensorPressao-pressao)>0.1) digitalWrite(BOMBA,LOW);
        if(deltaValvula>=delta) {
            Serial.println("FECHAR");Serial.print(deltaValvula);Serial.print(">=");Serial.println(delta);
            digitalWrite(VALVULA,LOW);
            Serial.println("VALVULA FECHADA");
            goto pause;
        }
        // para converter de segundos para milisegundos
        if(deltaCiclo%300>290) printExecutar();
    }
}

pause: printPause();
deltaCiclo = millis()-timeCiclo;
Serial.println("Em repouso");
while(deltaCiclo<60000){

```

```

sensorPressao=readPressao(false);
if(sensorPressao>pressao) digitalWrite(BOMBA,LOW);
if(keypad.getKey()=='#'){
  Serial.print("PAUSA!!");
  digitalWrite(BOMBA,LOW);
  lcd.clear();lcd.setCursor(0,0);
  lcd.print("EM PAUSA");lcd.newLine();
  lcd.setCursor(0,3);lcd.print("# = CONTINUAR");
  while(true){
    key=keypad.getKey();
    if(key=='#'){
      goto pause;
    }
  }
}
deltaCiclo = millis()-timeCiclo;
}
/*
 * FIM DA EXPERIÊNCIA
 */
Serial.print(ciclo);Serial.print(">=");Serial.print(tempo);Serial.print("?");
if(ciclo>=tempo){
  Serial.print("FIM TEMPO ");Serial.print(ciclo);Serial.print('>');Serial.println(tempo);
  lcd.clear(); lcd.setCursor(0,0);lcd.noBlink();lcd.noCursor();
  lcd.print("Terminado");
  digitalWrite(BOMBA,LOW);
  digitalWrite(VALVULA,LOW);
  pinMode(BOMBA,INPUT);
  pinMode(VALVULA,INPUT);
  while(true){delay(10000);}
}
}

////////////////////////////////////
//////////////////////////////////// Auxiliares////////////////////////////////////
////////////////////////////////////

double converterArea(int RAIO){ //RAIO em cm
  return (double)3.14159 * RAIO * RAIO; //retorna cm^2
}
void resetFunc(){
  lcd.clear();
  lcd.setCursor(0,0);
  lcd.print("Remova o cabo de");lcd.setCursor(0,1);lcd.print("energia");
}
void printExecutar(){
  lcd.clear();lcd.setCursor(0,0);
  lcd.print("Min ");lcd.print(ciclo);lcd.print("/");lcd.print(tempo);lcd.newLine();
  lcd.print("Bar ");lcd.print(sensorPressao);lcd.print("/");lcd.print(pressao);lcd.newLine();
  lcd.setCursor(0,3);
}
void printPause(){
  lcd.clear();lcd.setCursor(0,0);
  lcd.print("Minuto ");lcd.print(ciclo);lcd.print(" de ");lcd.print(tempo);lcd.newLine();
  lcd.print("Delta = ");lcd.print(delta);lcd.print("ms/min");
  lcd.setCursor(0,3);
  lcd.print("# = PAUSA");
}
}
unsigned int calcularDelta(double pressao, double caudal, int minutos){
  // Retorna milisegundos aberto por cada minuto

```

```

    double caudal_convertido = converterArea(RAIO)*caudal/10000; //caudal em L equivalente para a
area em cm^2 de raio = RAIO
    unsigned int total_ms_aberto = (1000*caudal*10000)/(43.6129*pressao + 103.5282);
    return total_ms_aberto/minutos;
}
double readPressao(bool printPressao){
    double voltage = (analogRead(A0)*5.0)/1023.0;
    //Serial.print("Volts: ");Serial.print(voltage);Serial.println("V");
    double pressure_pascal = (3.0*((double)voltage-0.47))*1000000.0;
    double pressure_bar = pressure_pascal/10e5;
    if(printPressao) {
        Serial.print("Pressure = ");Serial.print(pressure_bar);Serial.println(" bars");
    }
    return pressure_bar;
}
/* String inputReader(bool flag)
 * Interpretar numeros e controlos.
 * Símbolo # opera como ENTER.
 * Símbolo * opera como BACKSPACE.
 * Flag == true sinaliza para interpretar o '0' como símbolo '.'
 * Flag == false sinaliza para interpretar o '0' como dígito '0'
 */
String inputReader(bool flag){
    String input="0";
    int n = 0;
    if(flag==false){
        while(true){
            key = keypad.waitForKey();
            if(key == '#') return input;
            if(key == '*' && n>0){
                lcd.backspace();
                input[n-1]='\0';
                n--;
            }
            if(key>='0' && key<='9'){
                input += String(key);
                lcd.print(key);
                n++;
            }
        }
    }
    else if(flag==true){
        while(true){
            key = keypad.waitForKey();
            if(key == '#') {return input;}
            if(key == '*' && n>0){
                lcd.backspace();
                input.remove(input.length()-1,1);
                n--;
            }
            if(key>='1' && key<='9'){
                input += String(key);
                lcd.print(key);
                n++;
            }
            if(key=='0'){
                input += ".";
                lcd.print(".");
                n++;
            }
        }
    }
}

```

```

        Serial.println(input);
    }
}
}
void printDouble(double d){
    lcd.print((int)d);lcd.print(".");lcd.print("");
}
/* void validarInput(int m, int M, int *input)
 * void validarDouble(double m, double M, double *input)
 *
 * Enforçar que um valor fica dentro de uma gama admissível.
 * Se fora da gama, é aproximado ao limite mais próximo.
 */
int validarInt(int m, int M, int input){
    if(input<m) return m;
    if(input>M) return M;
    return input;
}
double validarDouble(double m, double M, double input){
    if(compareDoubles(input,m)) return m;
    if(compareDoubles(M,input)) return M;
    return input;
}
//precisão 2 casas decimais
bool compareDoubles(double a, double b) {
    int ai = (int)(a*100);
    int bi = (int)(b*100);
    return ai < bi;
}

```